

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев, А.А. Баранцов

**РАСЧЕТ СВОЙСТВ
ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2016

УДК 553.1

Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Баранцов А.А. Расчет свойств холодильных агентов: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 72 с.

Представлены сведения о соответственном состоянии веществ, приведенных переменных, расчетные зависимости, конкретные примеры расчетов термодинамических свойств и кинетических коэффициентов. Рассмотрены возможности методов прогнозирования теплофизических свойств нормальных жидкостей и газов на примере хладагента. В приложении даны таблицы теплофизических свойств.

Предназначено для бакалавров направлений: 14.03.01 – по дисциплине «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: канд. техн. наук, проф. А.А. Малышев

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., Баранцов А.А., 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебно-методическое пособие знакомит обучающихся с методами расчета термодинамических и теплофизических свойств рабочих веществ техники низких температур, используемых при конструировании теплообменных аппаратов, расчетах процессов теплоотдачи при движении в каналах, при внешнем омывании труб и трубных пучков, при изменении агрегатного состояния. Материалы учебно-методического пособия будут актуальны не только в процессе учебы, но и в дальнейшей работе выпускников в промышленности, а также в научной деятельности.

Авторы не делали специального акцента на теоретических представлениях, ограничившись напоминанием фундаментальных проблем физики и термодинамики. Приведены соотношения, обобщающие результаты экспериментальных и теоретических исследований реальных систем различной физической природы.

Объект особого внимания – холодильные агенты, рабочие вещества индустрии холода, интерес к свойствам которых стал особенно приоритетным после принятия судьбоносных Монреальского, Киотского и, особенно, Парижского (2015 г.) протоколов в рамках ООН.

Авторы сочли полезным привести в приложении таблицы теплофизических свойств известных в мировой практике галогенопроизводных предельных углеводородов.

Авторы выражают искреннюю признательность коллективу кафедры теоретических основ тепло- и хладотехники Университета ИТМО, отмечающей свой 70-летний юбилей, за ценные замечания и советы по улучшению настоящего издания.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

p	– давление, Па
π	– приведенное давление
T	– абсолютная температура, К
t	– температура, °С
τ	– приведенная температура
ρ	– плотность, кг/м ³
ω	– приведенная плотность
ν	– удельный объем, м ³ /кг
V	– объем, м ³
φ	– приведенный объем
z	– фактор сжимаемости
M	– молярная масса, кг/кмоль
R_i	– удельная газовая постоянная, кДж/(кг · К)
c_v	– удельная теплоемкость при постоянном объеме, кДж/(кг · К)
c_p	– удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг · К)
Δc_p	– конфигурационная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг · К)
Δc_v	– конфигурационная теплоемкость при постоянном объеме, кДж/(кг · К)
s	– удельная и молярная энтропия, кДж/(кг · К), кДж/(моль · К), соответственно
$\sigma_{\text{п}}$	– поверхностное натяжение, Н/м
η	– динамическая вязкость, Па · с
ν	– кинематическая вязкость, м ² /с
λ	– теплопроводность, Вт/(м · К)
x_i	– массовые доли компонентов смеси, %
n	– число атомов в молекуле
ω_a	– фактор ацентричности
μ	– дипольный момент, в единицах Дебая
$z_{\text{вр}}$	– число столкновений для вращательной релаксации
$\sigma, \varepsilon/k$	– параметры межмолекулярного взаимодействия, м; К соответственно
w	– скорость звука, м/с

Gu	– критерий Гульдберга
Ri	– критерий Риделя
A _p	– критерий Питцера
A	– критерий Филиппова

Индексы

'	– кипящая жидкость
"	– насыщенный пар
кр	– критический
н	– состояние насыщения
ад	– аддитивная величина
м	– масло
R	– хладагент
<i>id</i>	– идеальный газ
<i>i</i>	– компонент смеси
<i>s</i>	– нормальная температура кипения
<i>T</i>	– при атмосферном давлении

ВВЕДЕНИЕ

Соответственными состояниями называют состояния реальных газов или жидкостей, для которых независимые приведенные переменные одинаковы. Существуют группы веществ, для которых вид приведенного уравнения состояния (в физике и термодинамике это уравнение Ван-дер-Ваальса) одинаков. Так, закон соответственных состояний выполняется для инертных газов: аргона, криптона, ксенона, для фторхлорбромзамещенных метана (холодильных агентов) и для некоторых других групп веществ.

Если представить безразмерные (приведенные) переменные в виде $\pi = p/p_{кр}$, $\tau = T/T_{кр}$, $\varphi = v/v_{кр}$, приведенное уравнение состояния реального газа или жидкости может быть записано в следующем виде:

$$\Phi(\pi, \tau, \varphi, A, B, C) = 0.$$

Функции Φ должны быть тождественны для термодинамически подобных веществ. Если бы закон соответственных состояний выполнялся для всех веществ, то в уравнении (1) было бы достаточно только трех безразмерных параметров. Однако закон выполняется лишь для отдельных групп термодинамически подобных веществ, причем принадлежность к той или иной группе обуславливается наличием дополнительных безразмерных величин A, B, C и др.

В работах, посвященных этому вопросу, указывается различное число безразмерных величин. Довольно часто в качестве такой величины использовался фактор сжимаемости

$$z_{кр} = p_{кр} v_{кр} / RT_{кр}.$$

Л.П. Филипповым [1] введена безразмерная величина

$$A = 100\pi \text{ (для } \tau = 0,625\text{)}.$$

По Питцеру определяющий критерий

$$A_p = -\lg \pi - 1 \text{ (для } \tau = 0,7\text{)}.$$

Простые связи можно установить между критерием Риделя и критерием Питцера, часто называемым ацентрическим фактором:

$$Ri = 4,919A_p + 5,811,$$

а также между критерием Филиппова и критерием Питцера:

$$\lg A = 0,604 - 1,505A_p.$$

Во всех этих случаях индивидуальность вещества в приведенном уравнении состояния однозначно характеризуется лишь одним безразмерным параметром (критерием). Такой вид описания термодинамических свойств называют однопараметрическим обобщенным законом соответственных состояний.

Два определяющих критерия подобия предлагаются И.С. Бадылькесом, а разнообразие методов расчета и прогнозирования термодинамических и теплофизических свойств веществ на основе закона соответственных состояний исключительно велико. В их разработке большую роль сыграли исследования И.И. Новикова, М.П. Вукаловича, Л.Н. Филиппова, И.С. Бадылькеса, И.И. Перельштейна, М.К. Карапетьянца, Л. Риделя, К. Питцера и др.

Вопрос о предпочтительности выбора тех или иных приведенных переменных решается главным образом исходя из соображений удобства расчета, простоты и надежности аппроксимации, что будет показано на расчетных примерах.

1. РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

1.1. Термодинамические свойства

Для зависимости давления насыщенного пара и плотности насыщенной жидкости от температуры И.И. Перельштейн рекомендует уравнения [2]

$$p_n = p_{кр} \exp [R_i \ln \tau + (R_i - 4 + p_\alpha) \psi(\tau)]; \quad (1.1)$$

$$\rho = \rho_{кр} \exp [a_1 (1 - \tau)^{1/3} + a_2 s(\tau)], \quad (1.2)$$

где

$$\Psi(\tau) = 4[(\tau - 1)/\tau] + S(\tau) - 5,3 \ln \tau; \quad (1.3)$$

$$S(\tau) = (\tau - 1)[0,2(\tau + 1)^2 + 0,5]. \quad (1.4)$$

Значения критерия Ri и коэффициентов p_α , a_1 , a_2 , а также величин $T_{кр}$, $p_{кр}$, $\rho_{кр}$ для некоторых хладагентов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Характеристики хладагентов

Хладагент	$T_{кр}, K$	$p_{кр} \cdot 10^5,$ Па	$\rho_{кр},$ г/см ³	Ri	p_α	a_1	a_2
NH ₃	405,55	113,97	0,2350	7,0284	-0,3958	1,6839	0,3859
R11	471,15	43,70	0,5702	6,5974	-0,0617	1,4617	0,2492
R12	385,15	41,19	0,5791	6,5741	-0,0913	1,4388	0,2338
R22	369,28	49,90	0,5372	6,7964	-0,1644	1,4892	0,2865
R142в	409,60	41,38	0,4590	6,9530	-0,3192	1,3500	0,0060
R143а	346,25	41,10	0,4487	7,1818	-0,500	1,6251	0,4884
R152а	386,65	44,91	0,3514	6,9210	0	1,7150	0,4183
R290	369,96	42,69	0,2254	6,4618	-0,0799	1,4603	0,2676
R503	292,65	43,38	0,5894	6,6380	0	1,4581	0,3453

Критерий Ri можно рассчитать по формуле

$$Ri = [0,01316 - \ln p_{кр} + (4 - p_\alpha)\psi_s][\ln \tau_s + \psi_s]^{-1}, \quad (1.5)$$

где

$$\psi_s = 4(\tau_s - 1)/\tau_s - \ln \tau_s + s(\tau_s); \quad (1.6)$$

$$S(\tau_s) = (\tau_s - 1)[0,2(\tau + 1)^2 + 0,5]. \quad (1.7)$$

Коэффициент p_α можно принять равным 0,1. Для вычисления критической плотности используют формулу

$$\ln p_{кр} = 0,728 + \ln(0,1p_{кр}/RT_{кр}) + 0,088(Ri - p_{\alpha}), \quad (1.8)$$

а для вычисления a_1 и a_2 –

$$a_1 = 1,4 + 0,03 \ln(0,1p_{кр}/RT_{кр}^{3/2}) + 0,03Ri + 0,2p_{\alpha} + L_{\alpha}; \quad (1.9)$$

$$a_2 = 0,68 - 0,07Ri - 0,5p_{\alpha} + L_{\alpha}. \quad (1.10)$$

Поправку L_{α} можно в первом приближении принять равной нулю или уточнить хотя бы по одному известному значению плотности насыщенной жидкости.

Для расчета поверхностного натяжения используется формула, рекомендованная В.П. Железным [3]:

$$\sigma_{п} = \sigma_0 \tau^{\mu F(\tau)}, \quad (1.11)$$

где σ_0 – эмпирическая константа; $\mu = 1,2586$;

$$F(\tau) = 1 + D \left(\frac{\tau^{1,5}}{\ln \tau} \right) + E \left(\frac{\tau^2}{\ln \tau} \right) + G \left(\frac{\tau^3}{\ln \tau} \right), \quad (1.12)$$

здесь $D = -0,03534$; $E = -0,316563$; $G = 0,342461$.

Константа σ_0 определяется либо по одному известному значению поверхностного натяжения, либо из выражения

$$\sigma_0 R^{1/3} p_{кр}^{-2/3} T_{кр}^{-1/3} = (0,129 + 0,166\omega_a) 10^{-7}. \quad (1.13)$$

Уравнения (1.11)–(1.13) позволяют рассчитывать поверхностное натяжение в интервале температур $0,01 \leq \tau \leq 0,70$.

Для бинарных смесей хладагентов поверхностное натяжение находится из

$$\sigma_{см} = \sigma_1 (\sigma_{о,см}/\sigma_{01}) \tau^{F(\tau)[\mu_1(x-1)+\mu_2(1-x)]}. \quad (1.14)$$

Величины σ_1 , $\sigma_{о,см}$, σ_{01} определяются по нескольким значениям, полученным экспериментально, которых оказывается достаточно

для описания поверхностного натяжения во всем диапазоне молярных концентраций смеси x .

1.2. Кинетические коэффициенты

По И.И. Перельштейну [2] для определения теплопроводности и динамической вязкости на линии насыщения целесообразно применять уравнения

$$Y = Y_k \exp(p\theta + q\theta^{1/3}); \quad (1.15)$$

$$Y = Y_k \exp(p\theta + q\theta^{1/3}). \quad (1.16)$$

Буквой Y в уравнениях обозначена теплопроводность λ или динамическая вязкость η насыщенной жидкости либо сухого насыщенного пара.

Значения $\eta_{кр}$, $\lambda_{кр}$, p , $q = -q$ даны в табл. 1.2. Для всех включенных в таблицу веществ при расчете динамической вязкости $p = -1$, а теплопроводности $p = 0$.

Таблица 1.2

Параметры уравнений (1.15) и (1.16)

Хладагент	$\eta_{кр} \cdot 10^6$, Па · с	$q(-q)$ (для η)	p (для η)	$\lambda_{кр} \cdot 10^2$, Вт/(м · К)	$q(-q)$ (для λ)	p (для λ)
NH ₃	27,9	-1,75	-0,44	13,78	-1,93	0,79
R11	42,9	-1,75	-0,02	3,06	-1,29	0,60
R12	40,0	-1,75	-0,02	2,98	-1,37	0,69
R22	38,1	-1,72	0	3,39	-1,54	0,73
R142в	37,9	-1,84	-0,07	3,76	-1,23	0,90
R143а	35,5	-1,84	-0,07	3,69	-1,30	0,97
R152а	30,7	-1,71	0	4,14	-1,34	1,02
R 290	24,3	-1,68	0,01	4,99	-1,12	1,21
R 503	37,7	-1,74	-0,02	3,01	-1,60	0,73

Параметр θ в уравнениях (1.15), (1.16) рассчитывают по формуле для $\tau > 0,6$:

$$\theta = \ln \tau + 0,5[(\tau - 1)/\tau]^2 [(\tau - 1)/\tau \ln \tau] \times \\ \times [1 - 0,1(\tau - 1)^4/\tau^{-4}]. \quad (1.17)$$

Для динамической вязкости и теплопроводности газов при атмосферном давлении И.И. Перельштейн рекомендует уравнения

$$\lambda_T = \lambda_T^{\text{кр}} \exp(D_\lambda \theta); \quad (1.18)$$

$$\eta_T = \eta_T^{\text{кр}} \exp(D_\eta \theta). \quad (1.19)$$

В этих уравнениях θ вычисляется по формуле (1.17), а величины $\lambda_T^{\text{кр}}$, $\eta_T^{\text{кр}}$, D_λ определяются из табл. 1.3. Для всех веществ $D_\eta = 0,9$.

Таблица 1.3

Критические свойства переноса хладагентов [2]

Хладагент	$\eta_T^{\text{кр}} \cdot 10^6$, Па · с	$\lambda_T^{\text{кр}} \cdot 10^2$, Вт/(м · К)	D_λ
NH ₃	14,1	3,77	1,42
R11	17,1	1,54	1,29
R12	15,9	1,44	1,42
R22	15,4	1,50	1,55
R142в	14,4	1,95	1,56
R143а	13,5	1,85	1,66
R152а	12,48	2,03	1,73
R290	10,0	2,76	1,80
R503	15,0	1,29	1,58

При плотности, равной двум критическим, динамическую вязкость и теплопроводность рассчитывают с помощью уравнений

$$(\lambda - \lambda_T)/(\lambda_{\text{кр}} - \lambda_T^{\text{кр}}) = a_\lambda [\exp b_\lambda \omega - d_\lambda]; \quad (1.20)$$

$$(\eta - \eta_T)/(\eta_{\text{кр}} - \eta_T^{\text{кр}}) = a_\eta [\exp b_\eta \omega - d_\eta]. \quad (1.21)$$

Значения постоянных a , b , d приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Значения коэффициентов уравнений (1.20) и (1.21)

Приведенная плотность	a_η	b_η	d_η
0,0–0,3	0,26	1,584	1,000
0,3–2,0	0,54	1,079	1,081
Приведенная плотность	a_λ	b_λ	d_λ
0,0–0,5	1,22	0,535	1,000
0,5–2,0	1,13	0,670	1,069

Широко используются зависимости В.В. Алтунина [4]

$$\lambda - \lambda_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m (a_{ij}/\tau^j) \rho^i; \quad (1.22)$$

$$\ln(\lambda/\lambda_T) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m (a_{ij}/\tau^j) \rho^i. \quad (1.23)$$

Уравнение (1.23) В.В. Алтунин применил при обобщении данных по теплопроводности диоксида углерода.

В работе В.П. Барышева для теплопроводности хладагента R152a принята зависимость вида (1.22). Аналогичная зависимость получена С.В. Ильюшенко для обобщения данных по теплопроводности хладагентов R152a, R22 и R14. Значения коэффициентов a_{ij} обобщающих уравнений вида

$$\lambda - \lambda_T = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=0}^1 (a_{ij}/\tau^j) \omega^i \quad (1.24)$$

приведены в табл. 1.5.

Значения коэффициентов уравнения (1.24)

Коэффициенты a_{ij}	Хладагент		
	R152a	R22	R14
a_{10}	$0,8519167 \cdot 10^3$	$-0,2031354 \cdot 10^2$	$-0,9375244 \cdot 10^1$
a_{20}	$-0,2959392 \cdot 10^3$	$-0,2248015 \cdot 10^2$	$0,6567700 \cdot 10^2$
a_{30}	$-0,2964871 \cdot 10^2$	$-0,5376289 \cdot 10^1$	$0,7768819 \cdot 10^1$
a_{40}	$0,2027611 \cdot 10^2$	$0,1681960 \cdot 10^2$	$-0,460220 \cdot 10^2$
a_{50}	$0,3497559 \cdot 10^1$	$-0,3723213 \cdot 10^1$	$0,1651572 \cdot 10^2$
a_{11}	$-0,4995662 \cdot 10^3$	$-0,1043180 \cdot 10^2$	$0,2872052 \cdot 10^2$
a_{21}	$0,3049771 \cdot 10^3$	$0,7433466 \cdot 10^2$	$-0,7824683 \cdot 10^2$
a_{31}	$-0,5401443 \cdot 10^2$	$-0,5180652 \cdot 10^2$	$-0,5583786 \cdot 10^1$
a_{41}	$0,1811510 \cdot 10^2$	$0,9511112 \cdot 10^1$	$0,6080659 \cdot 10^2$
a_{51}	$-0,5545064 \cdot 10^1$	$-0,4444444 \cdot 10^0$	$-0,2085713 \cdot 10^2$
Погрешность	2–4 %	До 3,48 %	До 3,32 %

Для расчета теплопроводности хладагентов при атмосферном давлении рекомендованы следующие уравнения:

для R152a

$$\lambda_T = -1,15 \cdot 10^{-2} + 0,855 \cdot 10^{-4}T; \quad (1.25)$$

для R14

$$\lambda_T = -6,305 \cdot 10^{-3} + 7,405 \cdot 10^{-4}T; \quad (1.26)$$

для R22

$$\lambda_T = -8,269 \cdot 10^{-3} + 6,330 \cdot 10^{-5}T. \quad (1.27)$$

По уравнениям (1.25)–(1.27) рассчитывалась теплопроводность хладагентов: R152a – в диапазоне давлений 0,1–50 МПа и температур 220–430 К; R14 – для $\tau = 0,905 \div 1,308$ и $\omega = 0,081 \div 1,971$; R22 – для $\tau = 0,931 \div 1,175$ и $\omega = 0,105 \div 1,948$.

Для обобщения данных по теплопроводности жидких смесей известно уравнение Филиппова–Новоселовой

$$\lambda = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 - k_m x_1 x_2, \quad (1.28)$$

где $k_m = \alpha|\lambda_1 - \lambda_2|$, здесь $\alpha = 0,72$ (для растворов неассоциированных жидкостей); x_i – массовые доли компонентов.

По Цедербергу теплопроводность жидких растворов можно приближенно оценивать по правилу аддитивности.

В Университете ИТМО на основании экспериментальных данных по теплопроводности бинарных смесей жидких хладагентов R22/R115 и R22/R13B1 предложена зависимость

$$\lambda = \lambda_{ад}(1 - \beta x_1 x_2), \quad (1.29)$$

где $\lambda_{ад}$ – аддитивная составляющая теплопроводности; β – подгонный параметр; x_i – массовые доли компонентов смеси.

По данным авторов значение коэффициента β постоянно и для упомянутых выше смесей оказалось равным 0,2. Уравнение (1.29) было использовано Ю.А. Михно при анализе данных о теплопроводности бинарных смесей хладагентов R12/R22 и трехкомпонентной смеси R12/R22/R142b (R601). Установлено, что при помощи этого уравнения с тем же значением β можно вычислить с погрешностью эксперимента теплопроводность смеси R12/R22 и даже смеси R12/R22/R142b. При этом в уравнении (1.29) необходимо учесть концентрацию третьего компонента:

$$\lambda = \lambda_{ад}[1 - \beta x_1 x_2 (1 - x_3)]. \quad (1.30)$$

Следует отметить, что уравнения, аналогичные (1.29) и (1.30), были предложены С.И. Конрадом для описания экспериментальных данных о вязкости смесей хладагентов R12/R22, R12/R22/R142b и R601/R744. Как и для теплопроводности, значение β оказалось равным 0,2.

Интересна особенность применения уравнения (1.29) для описания концентрационной зависимости теплопроводности жидких смесей R14/R22 в работе С.В. Ильющенко. Дело в том, что критические температуры этих хладагентов значительно отличаются ($T_{кр} = 227,15$ К для R14 и $T_{кр} = 369,28$ К для R22), причем один из компонентов смеси – жидкость, другой может находиться в газовой фазе. В этом случае предлагается уравнение (1.29) записать в более общей форме:

$$\lambda(\pi, \tau) = \lambda_{\text{ад}}(\pi, \tau) + \beta x_1(1 - x_1), \quad (1.31)$$

где $\lambda_{\text{ад}}(\pi, \tau) = \lambda_1(\pi, \tau)x_1 + \lambda_2(\pi, \tau)x_2$.

Значения π и τ , при которых выбираются λ_1 и λ_2 , соответствуют значениям приведенных температур и давлений для смеси. В частности, x_1 и x_2 — молярные доли компонентов, для смеси жидких хладагентов параметр β также постоянен, но равен минус 0,0225.

Уравнение (1.31) можно использовать и для описания теплопроводности смеси в состоянии плотного газа, представив коэффициент β в виде

$$\beta = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=0}^1 (a_{ij}/\tau^j) \omega^i. \quad (1.32)$$

Значения коэффициентов уравнения (1.32), найденные по экспериментальным данным теплопроводности смеси R14/R22 и уравнению состояния Редлиха–Квонга–Вильсона, составили:

$$\begin{aligned} a_{10} &= 0,1038063 \cdot 10^4; & a_{20} &= -0,2169432 \cdot 10^4; & a_{30} &= 0,2486609 \cdot 10^3; \\ a_{40} &= -0,1809998 \cdot 10^3; & a_{50} &= 0,4989160 \cdot 10^3; & a_{11} &= 0,2522119 \cdot 10^3; \\ a_{21} &= 0,1019109 \cdot 10^4; & a_{31} &= 0,1052906 \cdot 10^4; & a_{41} &= -1294380 \cdot 10^4; \\ a_{51} &= -0,2673547 \cdot 10^3. \end{aligned}$$

Описанная методика расчета теплопроводности смесей хладагентов была разработана для составления таблиц теплопроводности при значениях $x_1 = 0,1702; 0,5799$ и $0,7854$ в интервале температур $0,7 < \tau < 1,25$ и давлений до 2π .

В холодильной технике широкое применение в качестве хладоносителей получили растворы хлоридов щелочных и щелочно-земельных металлов.

Уравнение для расчета теплопроводности водных растворов хлоридов кальция, натрия, магния и калия во всем интервале концентраций (вплоть до эвтектической) и интервале температур от 20°C до эвтектической по Перельштейну имеет вид

$$\lambda(t, x) = \lambda_{\text{в}}(t) - x(D + 1,5 \cdot 10^{-5}t). \quad (1.33)$$

Теплопроводность воды в функции температуры для указанного диапазона температур вычисляется по формуле

$$\lambda_{\text{в}}(t) = 0,561 + 1,88 \cdot 10^{-3}t. \quad (1.34)$$

Уравнения (1.33), (1.34) описывают теплопроводность воды и водных растворов в пределах погрешности опытных данных. Значения постоянной D для расчета свойств водных растворов хлоридов щелочных и щелочно-земельных металлов приведены в табл. 1.6. Необходимо отметить, что уравнение (1.33) может быть также рекомендовано для расчета и прогнозирования теплопроводности ингибированных хладоносителей. В этом случае x — это суммарная концентрация ингибитора и хлорида металла.

Таблица 1.6

Значения коэффициентов уравнений (1.33) и (1.35)

Водный раствор	Коэффициент			
	$D \cdot 10^3$	$-\theta \cdot 10^6$	e_1	$e_2 \cdot 10^2$
Хлорид кальция	1,00	1,038	8,34	4,90
Хлорид натрия	0,75	0,936	7,37	2,45
Хлорид магния	2,40	2,126	8,06	4,18
Хлорид калия	1,70	1,748	6,25	3,85

Значения D для других водных растворов можно определить, зная значение теплопроводности раствора при заданной температуре. Например, для расчета теплопроводности раствора при температуре 20 °С уравнение приобретает вид

$$\lambda(20, x) = 0,5985 + \theta x [1000 + (e_1 - 0,356)x + e_2 x^2]. \quad (1.35)$$

Значения коэффициентов θ , e_1 и e_2 даны в табл. 1.6.

Зная $\lambda(20, x)$ и определив D , по уравнению (1.33) можно рассчитать теплопроводность раствора во всем диапазоне температур, вплоть до эвтектической температуры.

Формула для определения плотности водных растворов хлоридов металлов в зависимости от концентрации и температуры имеет вид

$$\rho = 1000 + (e_1 - 1,78 \cdot 10^{-2} \cdot t)x + e_2x^2. \quad (1.36)$$

Теплопроводность смесей холодильное масло–холодильный агент может быть рассчитана по следующим формулам:

– для $-40 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\lambda = \frac{\lambda_M x_M + \lambda_R x_R}{1 + 10^{-3}(24,5 - 0,525t) \sin(x\pi)}; \quad (1.37)$$

– для $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\lambda = \frac{\lambda_M x_M + \lambda_R x_R}{1 + 10^{-3}(28,5 - 0,725t) \sin(x\pi)}, \quad (1.38)$$

где λ_M – теплопроводность масла при t ; λ_R – теплопроводность хлад-агента при t ; x_M, x_R – массовая концентрация масла и хладагента.

Теплопроводность для холодильных масел может быть рассчитана по таким формулам:

– для масла КМ30

$$\lambda = 0,1362 - 9,5 \cdot 10^{-5}t, \quad (1.39)$$

– для масла 51КМ33

$$\lambda = 0,1262 - 6,0 \cdot 10^{-5}t, \quad (1.40)$$

– для масла Шелл 22-12

$$\lambda = 0,1159 - 6,5 \cdot 10^{-5}t, \quad (1.41)$$

– для масла ХФ22-24

$$\lambda = 0,1194 - 7,25 \cdot 10^{-5}t, \quad (1.42)$$

– для масла ХФ12–18

$$\lambda = 0,1240 - 6,25 \cdot 10^{-5}t, \quad (1.43)$$

– для масла ХА30

$$\lambda = 0,1313 - 8,0 \cdot 10^{-5}t, \quad (1.44)$$

– для масла ХФ22с-16

$$\lambda = 0,1595 - 11,25 \cdot 10^{-5}t. \quad (1.45)$$

Для расчета плотности масло-фреоновых смесей (г/см^3) могут быть использованы следующие зависимости:

– для смеси масло 51КМ33/R11

$$\rho = (0,68x_R + 0,851) - (0,00145x_R + 0,000675)t; \quad (1.46)$$

– для смеси масло 51КМ33/R12

$$\rho = (0,57x_R + 0,851) - (0,002x_R + 0,000675)t; \quad (1.47)$$

– для смеси масло КМ30/R22

$$\rho = (0,38x_R + 0,920) - (0,002x_R + 0,0007)t, \quad (1.48)$$

где x_R – концентрация холодильного агента в смеси.

Предложенные зависимости (1.46)–(1.48) справедливы для $x_R < 0,5$ в интервале температур от -40 до 60 °С. Погрешность вычислений не превышает $\pm 0,4$ %.

Агрол и Тодос для расчета вязкости криогенных жидкостей на линии насыщения предложили уравнение [5]

$$(\eta - \eta_t)\xi = \alpha(\omega_0 - \omega)m, \quad (1.49)$$

где

$$\xi = T_{кр}^{1/6} / (M^{1/2} p_{кр}^{2/3}); \quad (1.50)$$

$$\alpha \cdot 10^5 = 268 - 530(3,35 - \omega_0)^{2,44}; \quad (1.51)$$

$$\omega_0 = RT_{кр}/p_{кр} \nu_{кр} = \rho_{кр} RT_{кр}/p_{кр}; \quad (1.52)$$

$$\omega = \rho/\rho_{кр}; \quad (1.53)$$

$$m = -2,092 + (3,35 - \omega_0)^{0,112}. \quad (1.54)$$

Для отдельных веществ получены следующие зависимости:
для водорода

$$(1.55) \quad \eta_T \xi = 40,0 \cdot 10^{-5} \tau^{0,94};$$

для других жидкостей

$$\eta_T \xi = 34,0 \cdot 10^{-5} \tau^{0,94}; \quad (1.56)$$

для водорода

$$\omega = 1 + 1,82(1 - \tau)^{0,378}; \quad (1.57)$$

для одноатомных жидкостей

$$\omega = 1 + 2,21(1 - \tau)^{0,41}; \quad (1.58)$$

для двухатомных жидкостей и метана

$$\omega = 1 + 2,36(1 - \tau)^{0,408}. \quad (1.59)$$

Пример расчета вязкости

Рассчитать вязкость жидкого азота на линии насыщения при 116,2 К. Для азота: $T_{кр} = 126,2$ К; $\xi = 0,0407$; $\omega_0 = 3,05$.

Находим

$$\tau = \frac{116,2}{126,2} = 0,9208,$$

при этом

$$\omega = 1 + 2,36(1 - 0,9208)^{0,408} = 1,84;$$

$$m = -2,092 + (3,35 - 3,05)^{0,112} = 1,218;$$

$$\alpha \cdot 10^5 = 268 - 530(3,35 - 3,05)^{2,44} = 239,9.$$

Тогда

$$(\eta - \eta_T)\xi = \frac{239,9 \cdot 10^{-5}}{(3,05 - 1,84)^{1,218}} = 190,24 \cdot 10^{-5};$$

$$\eta_T \xi = 34,0 \cdot 10^{-5} (0,9208)^{0,94} = 31,46 \cdot 10^{-5}.$$

Откуда

$$\eta \xi = 221,70 \cdot 10^{-5};$$

$$\eta = 0,0545 \text{ сП} = 54,5 \cdot 10^{-6}, \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Экспериментальное значение при этой температуре составило $\eta = 0,053 \text{ сП} = 53 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Уравнение для расчета вязкости водных растворов η хлоридов натрия, кальция и магния имеет вид

$$\eta(t, x) = \eta_b(t) \exp[x(a_0 + 0,001x)], \quad (1.60)$$

где

$$\ln \eta_b(t) = b_0 + \frac{b_1}{T}. \quad (1.61)$$

Значения постоянной a_0 для водных растворов хлоридов натрия, кальция и магния соответственно равны 0; 0,01 и 0,033. Значения коэффициентов b_0 и b_1 приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Значения коэффициентов уравнения (1.61)

Температура, °С	Коэффициент	
	b_0	b_1
30–0	-7,395	2171
0–минус 21	-10,986	3152
-21–минус 55	-7,873	2367

2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ

2.1. Термодинамические свойства

Возможности методов прогнозирования термодинамических свойств нормальных жидкостей рассмотрим на примере расчета свойств такого хладагента, как R11 (CCl_3F , трихлорфторметан, $M = 123,37$ кг/кмоль).

Определим параметр A Филиппова. Формула для вычисления A имеет следующий вид:

$$A = \frac{1}{\sqrt{n^*}} \frac{3,963 - 0,9236n^* + 0,06779(n^*)^2}{1 - 0,24825n^* + 0,0932(n^*)^2} + \Phi, \quad (2.1)$$

где

$$\Phi = -1,4 \frac{\mu^2}{C} \left(\frac{V_{\text{кр}}}{100} \right); \quad (2.2)$$

$$n^* = \sum_{i=1}^n n_i^* \quad (2.3)$$

здесь Φ – величина, учитывающая вклад, вносимый дипольным взаимодействием; C – постоянная параметра дисперсионного взаимодействия; $V_{кр}$ – молярный критический объем, см³/моль; n – число периферийных атомов молекулы; n_i^* – атомный и групповой инкремент, определяемый по данным табл. 2.1.

Таблица 2.1

Значения атомных и групповых инкрементов

Атомы, группы атомов	n_i^*
F, Cl, Br, I, CH ₄	1
CH, CH ₃	1
CH ₂	1,30
$\begin{array}{c} \\ - C - \\ \end{array}$ (в алканах)	0,15
= CH ₂ (в алкенах)	1
$\begin{array}{c} \quad \\ CH_2 - CH \\ \quad \end{array}$ (в циклах)	0,85

Величина Φ для полярных молекул, как правило, невелика и, по оценкам, не превышает 1 %, в то время как сама погрешность определения A , в том числе и для слабо полярных веществ, не более 2 %.

Учитывая, что молекула R11 неполярна, рассчитываем A без поправки Φ . По данным табл. 2.1, $n^* = 1 + 1 + 1 + 1 = 4$, откуда $A = 2,14$.

В основе расчета молярного критического объема лежит инкрементный расчет по табл. 2.2.

Молярный критический объем вещества вычисляется по формуле

$$V_{кр} = \sum_i V_i \quad (2.4)$$

Инкременты для расчета молярного критического объема

Атом	Доля	Связь	Доля
C	23,0	C = C	13,2
H	17,0	C = O	18,0
O	21,0	C = S	18,0
N	13,5	S = O	18,0
S	58,0	C ≡ C	32,7
F	33,1	C ≡ N	63,5
Cl	63,5	N ≡ N	60,5
Br	82,0	—	
I	110,9		

Для R11

$$V_{\text{кр}} = 15,1 + 3 \cdot 65,6 + 32,5 = 244,4 \text{ см}^3/\text{моль}.$$

Значение критической температуры можно вывести из следующей формулы:

$$\sqrt{C} = T_{\text{кр}}^{1/2} V_{\text{кр}} \frac{10^{-3}}{0,709 - 0,3583 \lg A}, \quad (2.5)$$

где $V_{\text{кр}}$ — молярный критический объем, $\text{см}^3/\text{моль}$.

Величина \sqrt{C} рассчитывается по формуле

$$\sqrt{C} = \sum_i \sqrt{C_i}. \quad (2.6)$$

Значения $\sqrt{C_i}$ приведены в табл. 2.3.

Значения $\sqrt{C_i}$ для разных атомов

Инкремент	Химический элемент				
	C	F	Cl	H	Br
$\sqrt{C_i}$	1,14	0,60	2,42	0,41	3,35

Для R11

$$\sqrt{C} = 1,14 + 3 \cdot 2,42 + 0,6 = 9,0,$$

откуда $T_k = 473,0$ К.

Определяем $z_{кр}$ по формуле

$$z_{кр} = 0,2563 + 0,0535 \lg A, \quad (2.7)$$

откуда $z_{кр} = 0,2740$. Зная $T_{кр}$ и $V_{кр}$, рассчитаем $p_{кр}$ из уравнения $z_{кр} = p_{кр} V_{кр} / (RT_{кр})$:

$$p_{кр} = \frac{z_{кр} \cdot R \cdot T_{кр}}{V_{кр}} = \frac{0,2740 \cdot 473,0 \cdot 0,8314}{244,4 \cdot 10^{-3}} = 4,41 \text{ МПа.}$$

Результаты расчета зависимости давления насыщенного пара R11 от температуры приведены в табл. 2.4. Они получены с помощью формулы

$$\lg\left(\frac{p^*}{p}\right) = 3,9726 \cdot \lg\left(\frac{T^*}{T}\right) + \left(\frac{T^*}{T} - 1\right). \quad (2.8)$$

Значение температуры T^* в (2.8) найдем из выражения

$$T^*/T = 0,03803 + \sqrt{1,882 - 1,5815 \lg A}, \quad (2.9)$$

откуда получим $T^* = 569,5$ К.

Таблица 2.4

Зависимость давления насыщенного пара R11 от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^5, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^5, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^5, \text{Па}$
-60	0,0122	20	0,88	100	8,17
-20	0,156	60	3,09	140	17,8

Результаты расчета плотности жидкости на линии насыщения хладагента R11 представлены в табл. 2.5. Расчеты проведены с использованием формулы

$$\omega' = 1 + 0,85(1 - \tau) + [2,086 - 0,654 \lg A](1 - \tau)^{\frac{1}{3}}. \quad (2.10)$$

Таблица 2.5

Плотность жидкости на линии насыщения хладагента R11

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho', \text{г/см}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho', \text{г/см}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho', \text{г/см}^3$
-20	1,59	20	1,50	60	1,40
0	1,54	40	1,45	80	1,35

Определим плотность жидкости при $t = 80 ^\circ\text{C}$:

$$\tau = \frac{353,15}{473,0} = 0,747.$$

Следовательно,

$$\omega' = 1 + 0,85 \cdot 0,253 + (2,086 - 0,654 \cdot \lg 2,14)(0,253)^{\frac{1}{3}} = 2,398.$$

Зная $V_{\text{кр}} = 244,4 \text{ см}^3/\text{моль}$, находим

$$\rho_{\text{кр}} = 4,092 \cdot 10^{-3} \frac{\text{моль}}{\text{см}^3} = 4,092 \cdot 10^{-3} \cdot 137,37 = 0,562 \frac{\text{г}}{\text{см}^3},$$

откуда $\rho' = 1,348 \text{ г/см}^3$.

Расчет плотности пара на линии насыщения проводится с использованием формулы

$$\lg \frac{\rho'}{\rho''} = 2 \lg \omega' + (\omega' - 1)^2 \left[0,389 + 0,109 \left(\frac{\omega' - 1}{4 - \omega'} \right)^2 \right]. \quad (2.11)$$

Рассмотрим пример определения ρ'' для той же температуры $t = 80$ °С. Получаем

$$\lg \frac{\rho'}{\rho''} = 2 \lg 2,398 + (2,398 - 1)^2 \left[0,389 + 0,109 \left(\frac{2,398 - 1}{4 - 2,398} \right)^2 \right] = 1,682$$

или $\rho'/\rho'' = 48,1$ и $\rho'' = 0,0280$ г/см³.

Исходным положением при рассмотрении калорических свойств (здесь речь пойдет о теплоемкости) является определение так называемой конфигурационной теплоемкости, т. е. разности между реальной молярной теплоемкостью и молярной теплоемкостью разреженного газа при той же температуре:

$$\Delta C_p = C_p - C_p^{id}; \quad (2.12)$$

$$\Delta C_v = C_v - C_v^{id}. \quad (2.13)$$

Вдоль линии насыщения конфигурационную теплоемкость ΔC_p и ΔC_v вычисляют по формулам

$$\Delta C_p = 20 + 3,9\tau^2/(1 - \tau) + (74 - 24,4/\tau + 12,5/\tau^2)\lg(4/A) \quad (2.14)$$

и

$$\Delta C_v = 25(1 - \tau) + 20\lg(4/A). \quad (2.15)$$

Уравнения (2.14) и (2.15) справедливы в диапазоне значений $\lg A = 0,6 \div 0,2$ и $0,5 < \tau < 0,95$ для ΔC_p и $0,5 < \tau < 0,7$ для ΔC_v .

Теплоемкость хладагентов в идеальном газе состоянии рассчитывают по уравнению

$$C_v^{id} = \sum_{i=0}^4 d_i \tau^i. \quad (2.16)$$

Значения коэффициентов d_i для некоторых хладагентов приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Значения коэффициентов d_i в уравнении (2.16)

Хладагент	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4
R717	1,7262	-1,4470	2,5387	-1,2409	0,21857
R11	0,02416	1,3173	-1,1442	0,49436	-0,08504
R12	-0,00515	1,1578	-0,77326	0,26424	-0,03663
R22	0,20428	0,31010	0,29043	-0,21960	0,04135
R142в	0,07801	1,1333	-0,29180	-0,01657	0,01477
R143а	0,10560	0,8630	0,06359	-0,14261	0,02842
R502	0,02105	1,06130	-0,55178	0,17476	-0,02568
R503	0,34906	0,28014	0,06125	-0,04375	0,00529

Для R11 при $\tau = 0,747$ и $t = 80$ °C

$$C_v^{id} = 0,02416 + 1,3173 \cdot 0,747 - 1,1442 \cdot 0,747^2 + 0,49436 \times \\ \times 0,747^3 - 0,08504 \cdot 0,747^4 = 0,5493 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = \\ = 75,457, \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

Отсюда $C_p^{id} = 75,457 + 8,314 = 88,77, \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$

Находим ΔC_p для $\tau = \frac{353,15}{473,0} = 0,747$:

$$\Delta C_p = 20 + 3,9 \cdot 747^2 / 0,253 + [74 - 24,4/747 + 12,5/747^2] \times \\ \times \lg(4/2,14) = 45,92, \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

Поскольку $C'_p = C_p^{id} + \Delta C_p$,

$$C'_p = 83,77 + 45,92 = 129,7, \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

Зависимость для определения поверхностного натяжения, рекомендуемая в литературе, имеет вид

$$\sigma_{\text{п}}/\sigma_{0,6} = \sum_{i=1}^5 a_i (1 - \tau)^i, \quad (2.17)$$

где

$$\sigma_{0,6} = \sigma_{0,6}^* R^{1/3} p_{\text{кр}}^{2/3} T_{\text{кр}}^{1/3}; \quad (2.18)$$

$$10^8 \cdot \sigma_{0,6}^* = \sum_{i=0}^3 f_i A_i. \quad (2.19)$$

Значения коэффициентов: $a_1 = 1,1239$; $a_2 = 9,116$; $a_3 = -29,0038$; $a_4 = 51,1109$; $a_5 = -35,105$; $f_0 = 7,56938$; $f_1 = -2,57629$; $f_2 = 0,711868$; $f_3 = -0,075567$.

На основании зависимости (2.17) для R11 и температуры 80 °C имеем

$$10^8 \cdot \sigma_{0,6}^* = 7,56938 - 2,57629 \cdot 2,14 + 0,711868 \cdot 2,14^2 -$$

$$-0,07567 \cdot 2,14^3 = 4,5746;$$

$$\sigma_{0,6} = 4,5746 \cdot 10^8 \cdot 8314^{1/3} (44,1 \cdot 10^5)^{2/3} \cdot 473,0^{1/3} =$$

$$= 19,4 \cdot 10^{-2}, \text{ Н/м};$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\Pi}/\sigma_{0,6} &= 1,1239 \cdot 0,253 + 9,116 \cdot 0,253^2 - 29,0038 \cdot 0,253^3 + \\ &+ 51,1109 \cdot 0,253^4 - 35,105 \cdot 0,253^5 = 0,5712, \end{aligned}$$

откуда $\sigma_{\Pi} = 19,4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5712 = 11,09 \cdot 10^{-3}$, Н/м.

Для нормальных и слабоассоциированных веществ предложено соотношение, связывающее поверхностное натяжение с плотностью жидкости и пара:

$$\sqrt[4]{\sigma_{\Pi}} = [p](\rho' - \rho'')/M, \quad (2.20)$$

где $[p]$ – парахор, который может быть рассчитан исходя из структуры молекулы,

$$[p] = \sum_i \Delta p_i. \quad (2.21)$$

Инкременты Δp_i для атомов водорода, фтора, хлора и брома составляют 15,7; 24,8; 53,0; 67,0. Если атом углерода является единственным, его парахор равен 10,1.

Определяем парахор R11:

$$[p] = \Delta p_C + \Delta p_{Cl} + \Delta p_F = 10,1 + 3 \cdot 53 + 24,8 = 193,9.$$

Тогда

$$\sigma_{\Pi} = \left[193,9 \frac{(1,348 - 0,028)}{137,37} \right]^4 = 12,05 \frac{\text{дин}}{\text{см}} = 12,05 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м.}$$

По Мак-Годану $[p] = 188,1$, тогда $\sigma_{\Pi} = 10,67$ дин/см = $10,67 \cdot 10^{-3}$ Н/м. Отметим, что в последнем случае парахоры рассчитываются как сумма атомных долей углерода, водорода, хлора, фтора и брома, которые равны 47,6; 24,7; 62,0; 30,5; 76,1. Затем из суммы долей вычитается по 19 на каждую связь в молекуле, т. е. для R11

$$[p] = 47,6 + 3 \cdot 62 + 30,5 - 4 \cdot 19 = 188,1.$$

Следовательно, можно сделать вывод, что расчет поверхностного натяжения во многом зависит от метода определения $[p]$.

2.2. Кинетические коэффициенты

Уравнение для вычисления динамической вязкости на линии насыщения имеет вид

$$\eta' = \eta_{\text{к}} \exp [p_{\eta}^s \theta(\tau) + q_{\eta}^s \sqrt[3]{\theta(\tau)}], \quad (2.22)$$

где

$$\ln \eta_{\text{к}} = \ln \eta_{\text{T}}^{\text{к}} + 0,9 + \Delta\eta, \quad (2.23)$$

$$\ln \eta_{\text{T}}^{\text{к}} = -13,87 + \ln(p_{\text{к}}^{2/3} R^{-1/2} T_{\text{к}}^{-1/6}). \quad (2.24)$$

Рекомендуется принимать

$$q'_{\eta} = -q''_{\eta} = -1,7 - \Delta\eta/0,53, \quad p''_{\eta} = -\Delta\eta, \quad p'_{\eta} = -1,8.$$

Для определения значений коэффициентов уравнения (2.22) целесообразно располагать хотя бы одним экспериментальным значением динамической вязкости на линии насыщения. При отсутствии опытных данных о динамической вязкости полезно принять во внимание, что для многих веществ $|\Delta\eta| < 0,2$. Можно принять $\Delta\eta = 0$, что увеличивает максимальную погрешность оценки, но в целом это погрешность не должна превысить 20–25 %.

Рассчитываем $\eta_{\text{T}}^{\text{к}}$ для хладагента R11:

$$\ln \eta_{\text{T}}^{\text{кр}} = -13,87 + \ln \left[\frac{(44,1 \cdot 10^5)^{2/3}}{\left(\frac{8314}{137,37}\right)^{1/2} 473,0^{1/6}} \right] = -6,7494,$$

откуда, принимая $\Delta\eta = 0$, имеем

$$\ln \eta_{\text{к}} = -6,7494 + 0,9 = -5,8494.$$

Определим $\theta(\tau)$ из выражения

$$\theta(\tau) = \ln \tau + 0,5[(\tau - 1)/\tau]^2[(\tau - 1 - \ln \tau)/\tau][1 - 0,1 \times (\tau - 1)^4/\tau^4]. \quad (2.25)$$

Имеем

$$\theta(\tau) = -0,292 + 0,5 \cdot 0,115(-0,047) = -0,295.$$

Значения динамической вязкости на линии насыщения при $T = 353,15 \text{ К}$ ($t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$)

$$\begin{aligned} \eta' &= 0,02882 \exp \left[-1,8(-0,295) + (-1,7) \sqrt[3]{(-0,295)} \right] = \\ &= 0,00015183 \approx 151 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta'' &= 0,02882 \exp \left[1,7 \sqrt[3]{(-0,295)} \right] = 0,00000929 = \\ &= 9,29 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}. \end{aligned}$$

Справочные значения вязкости:

$$\eta' = 223,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad \eta'' = 13,23 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Для расчета динамической вязкости жидкости на линии насыщения может быть использован также метод Морриса. Уравнение Морриса имеет вид

$$\lg(\eta'/\eta^*) = \xi(1/\tau - 1), \quad (2.26)$$

где η^* — псевдокритическая вязкость, значения ее даны в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Значения псевдокритической вязкости

Соединения	η^*	Соединения	η^*
Углеводороды	0,0875	Спирты	0,0819
Галогенозамещенные углеводороды	0,148	Простые эфиры, кетоны, альдегиды, ацетаты	0,096

Значение ξ рассчитывается с помощью уравнения

$$\xi = [0,0577 + \sum_i (b_i n_i)]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.27)$$

где b_i – структурные составляющие, значения которых приведены в табл. 2.8; n_i – число, показывающее, сколько раз группа появляется в молекуле.

Таблица 2.8

Значения структурных составляющих

Группа	b_i	Группа	b_i
$\begin{array}{c} \quad \\ -\text{CH}_3, \text{CH}_2, -\text{CH} \\ \quad \end{array}$	0,0825	-Br	0,2058
Галогенозамещенная $-\text{CH}_3$	0	-Cl	0,1470
Галогенозамещенная $-\text{CH}_2$ 	0,0893	-F	0,1344
Галогенозамещенная $-\overset{ }{\underset{ }{\text{C}}}-$	0	-I	0,1908
		-O- (для простых эфиров)	0,1090

По табл. 2.8 находим значение η^* для хладагента R11:
 $\eta^* = 148 \text{ сП} = 148 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Рассчитываем ξ . Имеем

$$\sum_i (b_i n_i) = Cl + Cl + F + C = 3 \cdot 0,1470 + 0,1344 + 0,0 = 0,5754,$$

тогда

$$\xi = (0,0577 + 0,5754)^{1/2} = 0,148.$$

По уравнению (2.26)

$$\lg \frac{\eta'}{0,148} = 0,5754 \left(\frac{1}{0,747} - 1 \right) = 0,1949.$$

Расчетное значение динамической вязкости при 80 °С равно 0,2318 сП = 231,8 · 10⁻⁶ Па · с.

Отметим еще одну возможность расчета динамической вязкости по методу Годоса [6, 7]:

– для $\omega < 0,1$

$$(\eta - \eta_T)\Phi = 1,656\omega^{1,111}; \quad (2.28)$$

– для $0,1 \leq \omega \leq 0,9$

$$(\eta - \eta_T)\Phi = 0,0607(9,045\omega + 0,63); \quad (2.29)$$

– для $0,9 \leq \omega \leq 2,6$

$$\lg [4 - \lg[(\eta - \eta_T) \cdot \xi]] = 0,6439 - 0,1005 \cdot \omega - \Delta, \quad (2.30)$$

где $\Delta = 0$ для $0,9 \leq \omega \leq 2,2$ или $\Delta = 4,75 \cdot 10^{-4}(\omega^3 - 10,65)^2$ для $2,2 < \omega < 2,6$.

При $\omega = 2,8$ и $\omega = 3$ произведение $(\eta - \eta_T)\Phi$ равно соответственно 90,0 и 250,0. В этих уравнениях

$$\Phi = T_{кр}^{\frac{1}{6}} / (M^{\frac{1}{2}} p_{кр}^{\frac{2}{3}}),$$

где $p_{кр}$ — в физических атмосферах; η_T — вязкость газа при атмосферном давлении.

Для хладагента R11 при 80 °С

$$\rho' = 1,348 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}; \quad \omega' = 2,398; \quad \rho'' = 0,0280 \text{ г/см}^3,$$

$$\omega'' = \frac{0,0280}{0,562} = 0,0498.$$

Для насыщенного пара

$$\Phi = 473,0^{1/6} / \left[137,37^{1/2} \left(\frac{44,1 \cdot 750}{760} \right)^{2/3} \right] = 0,0192,$$

откуда

$$(\eta - \eta_T) = \frac{1,656 \cdot 0,0498^{1,111}}{0,192} = 3,0788 \text{ мкП} = 0,30788 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Для насыщенной жидкости

$$\lg [4 - \lg [(\eta' - \eta_T)0,192]] = 0,6439 - 0,1005 \cdot 2,398 - 4,75 \cdot 10^{-4} \times \\ \times (2,398^3 - 10,65)^2,$$

откуда $4 - \lg(\eta' - \eta_T) 0,0192 = 2,5016$.

Получаем $(\eta' - \eta_T) = 1641 \text{ мкП} = 164,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Для расчета вязкости газа целесообразно воспользоваться методом Голубева [6]:

$$\eta_T = \eta_{кр} \tau^{0,965} \quad \text{для } \tau < 1; \quad (2.31)$$

$$\eta_T = \eta_k \tau^{0,71+0,29/\tau}, \quad (2.32)$$

где $\eta_k = 3,51/\Phi$.

Для R11 получаем: $\eta_k = 182,8$ мкПа; $\eta_T = 182,8 \cdot 0,747^{0,965} = 137,96$ мкПа $\approx 13,8 \cdot 10^{-6}$ Па \cdot с.

В итоге $\eta' = 177,9 \cdot 10^{-6}$ Па \cdot с, $\eta'' = 14,10 \cdot 10^{-6}$ Па \cdot с.

По теплопроводности насыщенной жидкости один из способов расчета предложили Л. Роббинс и С. Кингри [8]:

$$\lambda' = \frac{(88,0-4,9)10^{-3}}{\Delta S} \left(\frac{0,55}{\tau}\right)^N C_p \rho^{\frac{4}{3}}, \quad (2.33)$$

где ρ – молярная плотность жидкости, моль/см³; C_p – молярная теплоемкость жидкости, кал/(моль \cdot К); λ' – теплопроводность жидкости, кал/(см \cdot с \cdot К);

$$\Delta S = \Delta H/T_H + R \ln(273/T_H), \quad (2.34)$$

здесь ΔH – молярная теплота парообразования при нормальной температуре кипения.

Значения параметров H и N приведены в табл. 2.9.

Для R11 при $t = 80$ °С и $\tau = 0,747$ по табл. 2.9 $H = 3$ и, поскольку $\rho' = 1,348$ г/см³ > 1 , $N = 0$. Для расчета энтропии имеем

$$\begin{aligned} \Delta S &= \frac{182,72 \cdot 137,37}{4,19 \cdot 296,80} + 1,987 \ln \frac{273}{296,80} = 20,01 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = \\ &= 83,78 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

По уравнению (2.33)

$$\begin{aligned} \lambda' &= \frac{(88,0 - 4,94 \cdot 3) \cdot 10^{-3}}{20,01} \left(\frac{0,55}{0,747}\right)^0 \frac{129,7 \cdot 10^3}{4190} \left(\frac{1,348}{137,37}\right)^{4/3} = \\ &= 238,2 \cdot 10^{-6} \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{К}) = 0,0998 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Значения параметров уравнения (2.34)

Вещества	H	N
Вещества в жидком состоянии при плотности, г/см ³ :		
$\rho < 1$	–	1
$\rho > 1$	–	0
Неразветвленные углеводороды:		
насыщенные	0	–
циклические	0	–
Заместители:		
F –(один атом)	1	–
F –(два атома)	2	–
Cl –(один атом)	1	–
Cl –(два, три атома)	2	–
Cl –(четыре атома)	3	–
Br –(один атом)	4	–
Br –(два атома)	6	–

Справочное значение теплопроводности жидкого R11 на линии насыщения при 80 °С равно 0,0748 Вт/(м · К).

Другой способ расчета теплопроводности предложен в ЛТИХП. В этом методе для определения температурной зависимости теплопроводности жидкости используется формула [8]

$$\lambda/\lambda^* = a + b\tau, \quad (2.35)$$

где λ^* – значение теплопроводности жидкости при $\tau = 0,8$.

Для нахождения λ^* , коэффициентов a и b используются следующие соотношения:

$$a = 2,947 - 0,003M; \quad (2.36)$$

$$b = 1,250(1 - a); \quad (2.37)$$

$$1/\lambda^* = \xi Gu^4, \quad (2.38)$$

где

$$Gu = T_{кр}/T_H; \quad (2.39)$$

$$\xi = M^{1/2} T_{кр}^{1/6} p_{кр}^{-2/3}, \quad (2.40)$$

здесь $p_{кр}$ – критическое давление, бар; M – молярная масса, кг/кмоль.

Для R11 имеем

$$Gu = \frac{473,0}{296,8} = 1,594;$$

$$\xi = \frac{137,37^{1/2} \cdot 473,0^{1/6}}{44,1^{2/3}} = 2,621.$$

Тогда, поскольку $a = 2,947 - 0,003 \cdot 137,37 = 2,535$,
 $b = -1,919$, $\lambda^* = 0,059$, имеем

$$\lambda = [2,535 - (1,919 \cdot 0,747)]0,059 = 0,065 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Теплопроводность газообразного R11 при атмосферном давлении определим с помощью соотношения

$$\lambda_T = (\eta_T/M)[1,328C_v^{id} + 1,758R(0,875C_{v,вр}/z_{вр})], \quad (2.41)$$

где η_T – динамическая вязкость газа при атмосферном давлении, Па · с; C_v^{id} – молярная теплоемкость идеального газа, Дж/(моль · К); $C_{v,вр}$ – составляющая идеально-газовой теплоемкости, обусловленная вращательными степенями свободы; $z_{вр}$ – число столкновений для вращательной релаксации,

$$z_{вр} = z_{вр}^* [1 + (\pi/2)^{3/2}(1/T^*) + (\pi^2/4 + 2)(1/T^*) + \pi^{3/2}(1/T^*)^{3/2}]^{-1}, \quad (2.42)$$

здесь $z_{вр}^* = 25$;

$$T^* = T/(\varepsilon/k). \quad (2.43)$$

Оценку ε/k удобно производить следующим образом:

$$\varepsilon/k = 0,77T_{кр}, \quad (2.44)$$

или

$$\varepsilon/k = 1,15T_H. \quad (2.45)$$

Значение C_v^{id} определено по уравнению (2.16) и составило при температуре 80 °С 75,457 кДж/(кмоль · К). Для вязкости получено значение $\eta_T = 13,8 \cdot 10^{-6}$ Па · с. Составляющая $C_{v,вр} = R$ для линейных молекул и $C_{v,вр} = 3R/2$ для сферических молекул. Далее определим $z_{вр}$:

$$\frac{\varepsilon}{k} = 0,77 \cdot 473,0 = 364,2 \text{ К};$$

$$T^* = \frac{353,15}{364,2} = 0,970,$$

откуда

$$z_{вр} = 25[1 + 1,967 \cdot 1,015 + 4,465 \cdot 1,031 + 5,564 \cdot 1,047]^{-1} = 1,862.$$

Тогда значение теплопроводности газообразного хладагента R11

$$\lambda_T = \frac{13,8 \cdot 10^{-6}}{137,37} (1,328 \cdot 75,457 \cdot 10^3 + 1,758 \cdot 8314 - 0,875 \cdot 1,5 \cdot 8314/1,862) = 0,0109 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Справочное значение теплопроводности газообразного R11 при атмосферном давлении равно 0,0102 Вт/(м · К).

Теплопроводность газообразных холодильных агентов под давлением, большим атмосферного, возможно прогнозировать с помощью аналитического выражения, полученного в ЛТИХП [4]:

$$\lambda_{p,T} - \lambda_T = A[\exp(1,362 S) - \exp(-4,188 S^2)], \quad (2.47)$$

где

$$S = \omega\tau^{0,05}. \quad (2.48)$$

Значение коэффициента A может быть определено из данных о теплопроводности жидкости. В рассматриваемом случае для теплопроводности R11 в состоянии насыщения имеем: $T = 353,15$ К; $\rho' = 1,348$ г/см³; $\rho'' = 0,0280$ г/см³; $\rho_k = 0,562$ г/см³.

Тогда $\tau = 0,74$; $S' = 0,986 \cdot 2,399 = 2,364$; $S'' = 0,986 \cdot 0,0498 = 0,0491$.

Находим значение коэффициента A для температуры 80 °С:

$$\begin{aligned} A &= (\lambda' - \lambda_T) / [\exp(1,362S) - \exp(-4,188S^2)] = \\ &= \frac{0,065 - 0,0109}{\exp(1,362 \cdot 2,364) - \exp(-4,188 \cdot 2,364^2)} = 0,00216. \end{aligned}$$

Теперь можем рассчитать теплопроводность насыщенного пара R11 при той же температуре:

$$\begin{aligned} \lambda'' &= \lambda_T + A[\exp(1,362S) - \exp(-4,188S^2)] = \\ &= 0,0109 + 0,00216[\exp(1,362 \cdot 0,0491) - \exp(-4,188 \cdot 0,0491^2)] = \\ &= 0,01107 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

Табличное значение теплопроводности сухого насыщенного пара R11 при данной температуре равно 0,01158 Вт/(м · К) [4, 8].

ПРИЛОЖЕНИЕ

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 подобные соединения называли фреонами. Это название еще довольно часто можно встретить в советской и иностранной технической литературе, например фреон-12 (CF_2Cl_2), фреон-13 (CF_3Cl) 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 углеводородов обозначают торговыми марками, например Genetron, Isotron, Arctron, Algofrene, Frigen и др. В России в соответствии с ГОСТ 8502–73 и 19212–73 галоидные производные метана называют хладагентами. Та-

ким образом, хладагент R12 российского производства может обозначаться как хладон 12, R22 – как хладон 22 и т. д.

В табл. П1 приведены основные параметры хладагентов R11, R12, R22, R23, R32, R113, R123, R125, R134a, R152a, RC318, пропана (R290), изобутана (R600a), аммиака (R717), диоксида углерода (R744), воды (R718).

В табл. П2–П21 представлены теплофизические свойства (теплопроводность, кинематическая и динамическая вязкость, плотность, теплоемкость при постоянном давлении и число Прандтля) указанных выше хладагентов по данным справочников и обобщений [9–17].

Таблица П1

Общая характеристика холодильных агентов

Хладагент	Химическая формула	M , кг/кмоль	$T_{нк}$, К	$T_{кр}$, К	$p_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, кг/м ³	R , кДж/(кг · К)
R11	CFCl ₃	137,368	296,95	471,15	4,381	570,2	0,06053
R12	CF ₂ Cl ₂	120,914	243,35	385,15	4,131	533,2	0,06876
R22	CHF ₂ Cl	86,469	232,35	369,28	4,986	512,8	0,09616
R23	CHF ₃	70,014	191,05	299,09	4,835	525,1	0,11876
R32	CH ₂ F ₂	52,024	221,45	351,25	5,780	424,65	0,15981
R113	C ₂ F ₃ Cl ₃	187,376	320,75	487,30	3,414	576,4	0,04437
R123	C ₂ HF ₃ Cl ₂	152,931	301,05	456,85	3,67	553,0	0,05436
R125	C ₂ HF ₅	120,022	225,05	339,45	3,63	529,0	0,06927
R134a	C ₂ H ₂ F ₄	102,031	247,05	374,25	4,06	538,5	0,08148
R152a	C ₂ H ₄ F ₂	66,051	249,15	386,45	4,52	365,0	0,12587
RC318	C ₄ F ₈	200,031	267,18	388,47	2,780	549,9	0,04156
R290	C ₃ H ₈	44,094	231,05	369,95	4,264	225,0	0,18856
R600a изобутан	C ₄ H ₁₀	58,12	261,35	408,15	3,65	–	0,14305
R744 (диоксид углерода)	CO ₂	44,011	194,76	304,20	7,383	468,0	0,18892
R717 (аммиак)	NH ₃	17,03	239,85	406,15	11,42	235,0	0,48816
R718 (вода)	H ₂ O	18,02	373,15	647,35	22,10	512,8	0,46138

Теплофизические свойства хладагента R12 в состоянии насыщения

t , °C	p_n , МПа	ρ' , м ³ /кг	ρ'' , м ³ /кг	c_p' , кДж/ (кг·К)	c_p'' , кДж/ (кг·К)	r , кДж/кг	$\lambda' \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$\nu' \cdot 10^6$, м ² /с	$\nu'' \cdot 10^6$, м ² /с	Pr'	Pr''
30	0,1263	1463	7,174	0,891	0,588	179,5	87,1	8,98	0,278	1,561	4,16	0,732
40	0,1748	1439	9,724	0,901	0,600	175,6	84,6	9,47	0,250	1,207	3,83	0,736
50	0,2366	1414	12,92	0,911	0,612	171,5	82,1	9,99	0,225	0,929	3,53	0,738
60	0,3136	1389	16,88	0,922	0,625	167,2	79,7	10,50	0,203	0,734	3,26	0,739
70	0,4083	1363	21,72	0,935	0,639	162,7	77,2	11,03	0,1836	0,590	3,03	0,742
80	0,5229	1335	27,58	0,950	0,655	157,9	74,8	11,58	0,1676	0,48	2,84	0,748
90	0,6599	1306	34,64	0,967	0,672	152,7	72,4	12,16	0,1550	0,395	2,71	0,756
100	0,8219	1276	43,10	0,986	0,692	147,2	69,9	12,79	0,1450	0,328	2,61	0,764
110	1,012	1244	53,20	1,010	0,715	141,2	67,8	13,45	0,1355	0,275	2,51	0,776
120	1,232	1211	65,29	1,038	0,744	134,6	65,0	14,14	0,1267	0,232	2,45	0,797
130	1,486	1174	79,80	1,074	0,781	127,4	62,6	14,89	0,1185	0,1970	2,38	0,824
140	1,776	1135	97,32	1,118	0,829	119,3	60,3	15,72	0,1113	0,1681	2,34	0,862
150	2,107	1092	118,8	1,176	0,899	110,3	87,9	16,63	0,1042	0,1438	2,31	0,922
160	2,481	1045	145,9	1,252	1,013	99,9	55,5	17,65	0,0978	0,1230	2,31	1,034
170	2,904	991	181,3	1,357	1,231	87,6	53,0	19,08	0,0907	0,1049	2,31	1,227

Теплофизические свойства хладагента R22 в состоянии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$\eta' \cdot 10^6,$ Па·с	$\eta'' \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\nu'' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\lambda' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$a' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$a'' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	Pr'	Pr''
-40	338,7	10,19	0,2392	2,0839	115,0	6,66	0,0722	2,3481	3,311	0,887
-35	314,2	10,42	0,2244	1,7251	112,6	7,01	0,0706	1,9538	3,178	0,884
-30	294,5	10,66	0,2127	1,4406	110,2	7,37	0,0694	1,6380	3,061	0,879
-25	276,8	10,90	0,2023	1,2138	107,9	7,47	0,0684	1,3791	2,955	0,879
-20	260,4	11,15	0,1927	1,0305	105,5	8,12	0,0676	1,1689	2,849	0,881
-15	245,3	11,39	0,1838	0,8809	103,1	8,51	0,0669	0,9958	2,746	0,884
-10	231,4	11,66	0,1755	0,7591	100,8	8,91	0,0662	0,8518	2,649	0,891
-5	218,9	11,93	0,1683	0,6580	98,4	9,32	0,0630	0,7322	2,577	0,898
0	208,0	12,21	0,1621	0,5738	95,7	9,75	0,0641	0,6320	2,528	0,907
5	198,2	12,48	0,1566	0,5024	93,4	10,19	0,0630	0,5476	2,485	0,917
10	188,4	12,74	0,1510	0,4420	91,2	10,65	0,0618	0,4762	2,442	0,928
15	179,0	13,06	0,1456	0,3910	89,1	11,12	0,0605	0,4151	2,405	0,942
20	170,0	13,37	0,1404	0,3473	86,6	11,61	0,0589	0,3628	2,380	0,957
25	161,0	13,69	0,1352	0,3095	84,5	12,12	0,0574	0,3177	2,355	0,974

Окончание табл. ПЗ

$t, ^\circ\text{C}$	$\eta' \cdot 10^6,$ Па·с	$\eta'' \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\nu'' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\lambda' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$a' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$a'' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	Pr'	Pr''
30	152,0	14,04	0,1298	0,2771	82,4	12,66	0,0558	0,2787	2,326	0,994
35	143,1	14,42	0,1244	0,2491	80,4	13,22	0,0541	0,2442	2,294	1,019
40	134,2	14,83	0,1189	0,2280	78,4	13,82	0,0524	0,2176	2,271	1,048
45	125,8	15,28	0,1137	0,2030	76,1	14,45	0,0504	0,1876	2,253	1,084
50	118,4	15,78	0,1094	0,1841	74,2	15,13	0,0487	0,1632	2,247	1,128
55	112,4	16,34	0,1063	0,1674	72,3	15,86	0,0468	0,1412	2,271	1,186
60	107,2	16,99	0,1041	0,1526	70,3	16,66	0,0447	0,1210	2,324	1,262
65	101,4	17,74	0,1013	0,1394	68,0	17,53	0,0423	0,1021	2,393	1,366
70	94,7	18,63	0,0976	0,1276	65,8	18,52	0,0396	0,083	2,464	1,514
75	88,0	19,71	0,0971	0,1169	63,4	19,65	0,0363	0,0673	2,590	1,739
80	80,9	21,10	0,0903	0,1074	60,9	21,0	0,0321	0,0508	2,812	2,116
85	73,1	22,80	0,0862	0,0980	57,6	22,7	0,0261	0,0347	3,302	2,827
90	63,6	24,40	0,0811	0,0892	53,3	25,0	0,0171	0,0188	4,476	4,737

Теплофизические свойства хладагента R23 в состоянии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$\eta' \cdot 10^6,$ Па·с	$\eta'' \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\nu'' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\lambda' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$a' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$a'' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	Pr'	Pr''
-40	164,3	11,68	0,1300	0,390	103,2	11,31	0,0987	0,441	1,318	0,884
-35	154,0	11,98	0,1241	0,334	99,3	11,89	0,0810	0,369	1,533	0,904
-30	143,9	12,30	0,1183	0,287	95,8	12,52	0,0700	0,309	1,691	0,928
-25	133,7	12,64	0,1123	0,248	92,5	13,20	0,0623	0,261	1,804	0,948
-20	125,8	13,01	0,1082	0,215	89,1	13,95	0,0565	0,217	1,915	0,992
-15	117,6	13,42	0,1038	0,1877	85,5	14,78	0,0517	0,1808	2,01	1,038
-10	108,8	13,87	0,0987	0,1643	81,2	15,71	0,0477	0,1499	2,07	1,096
-5	99,8	14,39	0,0934	0,1441	79,0	16,76	0,0441	0,1228	2,12	1,174
0	90,7	14,98	0,0879	0,1267	75,3	17,97	0,0403	0,0988	2,18	1,282
5	81,7	15,69	0,0826	0,1114	72,0	19,38	0,0363	0,0773	2,27	1,442
10	73,1	16,56	0,0775	0,0979	68,3	21,31	0,0319	0,0576	2,43	1,701
15	64,7	17,71	0,0728	0,0857	64,2	23,30	0,0261	0,0393	2,78	2,180

Теплофизические свойства хладагента R32 в состоянии насыщенной жидкости

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{МПа}$	$\rho', \text{м}^3/\text{кг}$	$c_p', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$\lambda', \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	$a'\cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\eta'\cdot 10^4, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu'\cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$\sigma\cdot 10^3, \text{Н}/\text{м}$	$\beta\cdot 10^3, 1/\text{K}$	Pr'
-70	0,035	1250	1,718	0,165	7,680	5,37	4,296	24,8	–	5,59
-60	0,063	1227	1,721	0,156	7,388	4,57	3,724	22,8	1,95	5,04
-50	0,109	1202	1,725	0,148	7,138	3,86	3,211	20,7	2,15	4,50
-40	0,178	1175	1,731	0,140	6,883	3,29	2,800	18,8	2,30	4,07
-30	0,227	1147	1,742	0,132	6,606	2,75	2,398	16,8	2,55	3,63
-20	0,413	1118	1,758	0,125	6,360	2,33	2,084	14,9	2,75	3,28
-10	0,595	1087	1,782	0,119	6,143	1,98	1,822	13,1	2,90	2,96
0	0,832	1055	1,817	0,112	5,843	1,67	1,583	11,3	3,20	2,71
10	1,132	1020	1,865	0,106	5,572	1,43	1,402	9,58	3,60	2,52
30	1,964	941	2,038	0,0926	4,828	1,08	1,148	6,22	4,55	2,38
50	3,182	846	2,474	0,0790	3,774	0,799	0,944	3,18	7,10	2,50
60	3,974	778	3,052	0,0766	3,226	0,687	0,883	1,86	10,8	2,74
70	4,916	683	5,060	0,0751	2,173	0,558	0,817	0,74	–	3,76

Таблица П6

Теплофизические свойства хладагента R32 в состоянии сухого насыщенного пара

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{МПа}$	$\rho'', \text{м}^3/\text{кг}$	$c_p'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\lambda'', \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$a''10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\eta''10^4, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu''\cdot10^7, \text{м}^2/\text{с}$
-70	1,08	412,3	0,717	7,90	10,202	7,89	7,306
-60	1,90	401,1	0,737	8,36	5,9701	8,28	4,358
-50	3,16	389,6	0,762	8,85	3,6750	8,68	2,747
-40	5,00	377,6	0,792	9,38	2,3690	9,08	1,816
-30	7,59	365,1	0,829	9,96	1,5830	9,49	1,250
-20	11,1	351,9	0,874	10,6	1,0926	9,91	0,8928
-10	15,8	337,8	0,928	11,3	0,7707	10,3	0,6519
0	22,0	322,8	0,995	12,1	0,5528	11,2	0,5090
10	30,0	306,4	0,078	12,9	0,3989	11,7	03900
20	40,3	288,5	0,185	13,9	0,2911	12,2	0,3030
30	53,7	268,4	0,332	15,1	0,2111	12,9	0,2400
40	71,2	245,6	0,550	16,5	0,1495	13,6	0,1910
50	94,9	218,6	0,918	18,2	0,09999	14,4	0,1520
60	129,3	184,7	0,713	25,3	0,07212	15,7	0,1210
70	187,9	135,3	0,901	40,3	0,03634	17,9	0,0953

Теплофизические свойства хладагента R113 в состоянии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{МПа}$	$\rho', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\eta' \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\eta'' \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\lambda' \cdot 10^3, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\lambda'' \cdot 10^3, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\sigma \cdot 10^3, \text{Н}/\text{м}$
-30	–	–	–	1621	8,89	84,6	6,85	–
-20	0,0051	1688	0,460	1332	9,30	81,4	7,23	22,2
-10	0,0089	1663	0,773	1125	9,64	78,3	7,62	21,1
0	0,0149	1638	1,341	952	9,99	75,5	8,03	19,9
10	0,0237	1613	1,917	810	10,3	72,8	8,43	18,7
20	0,0364	1587	2,861	708	10,7	70,3	8,84	17,6
30	0,0541	1562	4,162	622	11,0	68,0	9,28	16,5
40	0,0781	1536	5,480	547	11,4	65,8	9,69	15,4
50	0,1097	1510	8,037	480	11,7	63,8	10,1	14,3
60	0,1506	1484	10,84	431	12,1	61,8	10,6	13,2
70	0,2023	1457	14,34	389	12,4	59,9	10,9	12,2
80	0,2665	1430	18,62	353	12,8	58,1	11,5	11,2
90	0,3449	1402	23,95	320	13,2	56,3	12,0	10,2
100	0,4395	1373	30,36	289	13,6	54,6	12,5	9,18
110	0,5521	1344	38,07	263	14,0	53,0	13,0	8,20

Окончание табл. П7

$t, ^\circ\text{C}$	$p_H,$ МПа	$\rho',$ м ³ /кг	$\rho'',$ м ³ /кг	$\eta' \cdot 10^6,$ Па·с	$\eta'' \cdot 10^6,$ Па·с	$\lambda' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$\sigma \cdot 10^3,$ Н/м
120	0,6847	1313	47,13	240	14,5	51,3	13,6	7,24
130	0,8393	1281	58,38	219	14,9	49,7	14,1	6,30
140	1,018	1247	71,63	201	15,4	48,0	14,7	5,38
150	1,224	1211	87,59	183	16,0	46,4	15,3	4,49
160	1,459	1172	107,0	164	16,6	44,6	16,1	3,63
170	1,726	1129	131,0	148	17,9	42,8	17,4	2,81
180	2,029	1080	161,4	133	19,2	42,4	18,9	2,04
190	2,372	1022	201,9	121	22,3	41,5	21,5	1,34
200	2,760	946,5	261,2	109	25,4	41,5	26,3	0,72
210	3,198	816,7	379,6	87,2	34,2	45,5	43,3	0,19

Таблица П8

Теплофизические свойства хладагента R123 в состоянии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'',$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$r,$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$c_p',$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$c_p'',$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\lambda' \cdot 10^3,$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\lambda'' \cdot 10^3,$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\nu' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\nu'' \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$
-20	1521	0,912	186,0	0,976	0,622	85,5	7,27	0,5076	7,1601
-10	1496	1,482	182,1	0,988	0,639	82,1	7,70	0,4512	4,5749
0	1471	2,311	178,3	1,000	0,656	79,0	8,15	0,4024	3,1848
10	1446	3,476	174,3	1,011	0,673	76,1	8,60	0,3603	2,1951
20	1420	5,062	170,3	1,021	0,690	73,4	9,07	0,3239	1,5626
30	1394	7,171	166,1	1,032	0,708	70,8	9,55	0,2912	0,1412
40	1368	9,911	161,8	1,043	0,728	68,4	10,0	0,2632	0,8546
50	1341	13,41	157,3	1,054	0,747	66,0	10,6	0,2394	0,6532
60	1314	17,81	152,6	1,067	0,758	63,8	11,1	0,2184	0,5087
70	1286	23,26	147,7	1,080	0,791	61,6	11,6	0,1998	0,4024
80	1257	29,97	142,5	0,816	0,816	59,5	12,2	0,1838	0,3230
90	1227	38,17	137,0	1,114	0,844	57,4	12,8	0,1695	0,2620
100	1195	48,16	131,2	1,135	0,877	55,3	13,5	0,1565	0,2159
110	1162	60,30	124,8	1,161	0,914	53,3	14,1	0,1446	0,1774
120	1127	75,15	117,9	1,194	0,961	51,2	14,9	0,1340	0,1477
130	1089	93,46	110,2	1,238	1,022	49,1	15,7	0,1240	0,1252
140	1046	116,4	101,5	1,301	1,109	46,9	16,5	0,1147	0,1048
150	998,2	146,1	91,49	1,401	1,246	46,2	18,9	0,1052	0,0890
160	940,1	186,6	79,21	1,588	1,513	45,1	21,5	0,0953	0,0750

Теплофизические свойства хладагента R125 в состоянии насыщения

t , °C	c_p' , кДж/(кг·К)	c_p'' , кДж/(кг·К)	$\lambda' \cdot 10^4$, Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$\nu' \cdot 10^6$, м ² /с	$\nu'' \cdot 10^6$, м ² /с	$\eta' \cdot 10^6$, Па·с	$\eta'' \cdot 10^6$, Па·с	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м
-90	1,017	0,600	–	–	0,5141	12,2667	785	7,82	18,9
-80	1,038	0,623	–	–	0,4355	6,5685	651	8,25	17,4
-70	1,062	0,648	–	–	0,3735	3,7877	546	8,67	16,0
-60	1,086	0,673	970	8,52	0,3219	2,3293	460	9,11	14,5
-50	1,111	0,700	929	9,15	0,2787	1,5094	389	9,55	13,1
-40	1,136	0,730	889	9,80	0,2430	1,0226	331	10,0	11,8
-30	1,161	0,762	849	10,5	0,2133	0,7216	283	10,5	10,5
-20	1,178	0,798	810	11,2	0,1890	0,5198	244	11,0	9,17
-10	1,217	0,839	772	12,1	0,1684	0,3906	211	11,6	7,91
0	1,294	0,887	732	13,0	0,1516	0,3064	184	12,2	6,68
10	1,305	0,948	693	14,1	0,1364	0,2374	160	12,9	5,48
20	1,374	1,029	654	15,5	0,1224	0,1870	138	13,7	4,32
30	1,475	1,154	612	17,2	0,1105	0,1485	119	14,5	3,21
40	1,634	1,378	868	19,4	0,0990	0,1193	101	15,6	2,18
50	1,946	1,909	518	22,1	0,0873	0,0956	82,8	17,1	1,26
60	3,176	4,258	453	25,8	0,0750	0,0763	63,4	20,0	0,48

Теплофизические свойства хладагента R134a в состоянии насыщения

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$c_p',$ кДж/(кг·К)	$c_p'',$ кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^4,$ Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$\eta' \cdot 10^6,$ Па·с	$\eta'' \cdot 10^6,$ Па·с	$\sigma \cdot 10^3,$ Н/м
-100	1,1842	0,5932	1370	–	981	–	–
-90	1,1892	0,6473	1330	–	820	–	–
-80	1,1981	0,6416	1285	–	691	–	–
-70	1,2096	0,6665	1245	7,47	586	–	–
-60	1,2230	0,6923	1204	8,02	499	–	–
-50	1,2380	0,7196	1163	8,60	415	–	–
-40	1,2546	0,7490	1120	9,19	334	–	17,60
-30	1,2728	0,7808	1077	9,82	278	9,71	16,04
-20	1,2930	0,8155	1030	10,5	226	10,16	14,51
-10	1,3155	0,8543	983	11,2	199	10,59	13,01
0	1,3410	0,8972	943	11,9	169	11,02	11,56
10	1,3703	0,9454	920	12,7	149	11,46	10,14
20	1,4048	1,0006	860	13,5	135	11,91	8,76
30	1,4464	1,0654	820	14,4	122	12,38	7,42
40	1,4984	1,1445	781	15,4	109	12,89	6,13
50	1,5661	1,2460	742	16,5	96	13,47	4,89
60	1,6601	1,3868	704	17,7	80	14,15	3,72
70	1,8039	1,6050	662	19,2	69	15,04	2,61
80	2,0648	2,0122	625	23,6	–	16,31	1,60

Таблица П11

Теплофизические свойства хладагента R152a в состоянии насыщенной жидкости

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{МПа}$	$\rho', \text{м}^3/\text{кг}$	$c_p', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$\lambda', \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	$\alpha' \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\eta' \cdot 10^4, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu' \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$\sigma \cdot 10^3, \text{Н}/\text{м}$	$\beta \cdot 10^3, 1/\text{K}$	Pr'
-70	0,0077	1103	1,585	0,1483	8,483	5,53	5,014	24,7	–	5,9
-60	0,0152	1084	1,602	1,1407	8,102	4,74	4,373	23,0	1,75	5,4
-50	0,0279	1065	1,619	0,1339	7,766	3,94	3,750	21,3	1,75	4,8
-40	0,0483	1046	1,636	0,1276	7,456	3,28	3,136	19,7	1,80	4,2
-30	0,0792	1024	1,654	0,1217	7,186	2,94	2,871	18,1	1,95	4,0
-20	0,1241	1003	1,673	0,1162	6,924	2,68	2,672	16,6	2,10	3,9
-10	0,1870	981	1,694	0,1110	6,679	2,47	2,518	15,1	2,20	3,8
0	0,2720	960	1,719	0,1061	6,429	2,13	2,319	13,6	2,40	3,4
10	0,3836	936	1,747	0,1014	6,201	1,88	2,008	12,2	2,55	3,2
20	0,5267	911	1,781	0,0968	5,966	1,72	1,888	10,7	2,70	3,2
30	0,7062	886	1,822	0,0924	5,724	1,57	1,772	9,3	3,00	3,1
40	0,9273	858	1,873	0,0881	5,482	1,42	1,655	8,0	3,30	3,0
50	1,196	829	1,938	0,0838	5,216	1,28	1,544	6,7	3,60	2,96
60	1,517	792	2,025	0,0795	4,914	1,13	1,414	5,4	4,00	2,88
70	1,899	765	2,148	0,0750	4,564	1,02	1,333	4,1	4,50	2,92
80	2,349	729	2,338	0,0703	4,125	0,870	1,193	3,0	5,25	2,89
90	2,876	688	2,681	0,0686	3,919	0,722	1,049	1,9	6,75	8,82
100	3,492	636	3,522	0,0666	2,937	0,576	0,906	1,0	11,5	3,05
110	4,212	543	–	0,0715	–	0,428	0,788	0,2	–	–

Теплофизические свойства хладагента R152a в состоянии сухого насыщенного пара

t , °C	ρ'' , М ³ /кг	r , кДж/кг	c_p'' , кДж/(кг·К)	$\lambda'' \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$a'' \cdot 10^6$, м ² /с	$\eta'' \cdot 10^6$, Па·с	$\nu'' \cdot 10^6$, м ² /с	Pr''
-70	0,299	370,5	0,795	7,5	31,55	5,70	19,06	0,60
-60	0,568	362,2	0,819	8,0	17,20	7,02	12,36	0,72
-50	1,008	353,7	0,846	8,5	9,968	7,35	7,29	0,73
-40	1,681	345,1	0,875	9,1	6,187	7,68	4,57	0,74
-30	2,670	336,2	0,907	9,7	4,005	8,02	3,004	0,75
-20	4,068	327,0	0,943	10,3	2,685	8,35	2,053	0,76
-10	5,987	317,4	0,952	11,0	1,871	8,70	1,453	0,78
0	8,454	307,4	1,026	11,7	1,349	9,40	1,112	0,82
10	11,89	296,8	1,075	12,5	0,9782	9,77	0,822	0,84
20	16,17	285,6	1,131	13,4	0,7327	10,2	0,631	0,86
30	21,62	273,6	1,195	14,3	0,5535	10,6	0,490	0,88
40	28,47	260,6	1,270	15,2	0,4204	11,0	0,386	0,92
50	37,07	246,5	1,363	16,3	0,3226	11,3	0,305	0,94
60	47,90	230,9	1,481	17,5	0,2466	12,0	0,250	1,02
70	61,74	213,3	1,644	18,8	0,1852	12,6	0,204	1,10
80	78,91	192,9	1,895	20,4	0,1349	13,3	0,167	1,24
90	104,5	168,1	2,357	25,1	0,1019	14,3	0,137	1,34
100	142,5	135,2	3,595	32,6	0,0636	15,8	0,111	1,74
110	223,2	76,8	–	62,6	–	19,8	0,089	–

Таблица П13

Теплофизические свойства хладагента R318 в состоянии насыщенной жидкости

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{МПа}$	$\rho', \text{м}^3/\text{кг}$	$c_p', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\lambda', \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\alpha' \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\eta' \cdot 10^4, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu' \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$\sigma \cdot 10^3, \text{Н}/\text{м}$	$\beta \cdot 10^3, 1/\text{К}$	Pr'
-40	0,0193	1731,3	0,982	0,084	0,494	10,7	0,62	141,2	19,4	12,5
-30	0,0333	1696,8	1,001	0,081	0,475	8,83	0,52	129,4	19,8	10,9
-20	0,0546	1662,2	1,109	0,077	0,458	7,45	0,45	117,7	20,7	9,8
-10	0,0855	1627,3	1,038	0,074	0,442	6,38	0,39	107,9	21,8	8,9
0	0,1290	1591,7	1,058	0,071	0,422	5,60	0,35	98,1	23,1	8,3
10	0,1878	1555,2	1,078	0,068	0,406	5,00	0,32	88,3	24,6	7,9
20	0,2655	1517,4	1,098	0,065	0,389	4,51	0,30	78,4	26,4	7,6
30	0,3656	1477,9	1,119	0,061	0,372	4,03	0,27	68,6	28,6	7,3
40	0,4918	1436,1	1,141	0,058	0,363	3,73	0,26	58,8	31,3	7,3
50	0,6482	1391,4	1,170	0,054	0,331	3,34	0,24	49,0	34,0	7,2
60	0,8393	1342,8	1,205	0,051	0,315	3,04	0,23	40,2	38,7	7,1
70	1,0698	1288,8	1,250	0,046	0,286	2,75	0,21	31,4	46,9	7,4
80	1,3453	1226,5	1,315	0,042	0,261	2,46	0,20	22,6	62,6	7,7
90	1,6720	1150,3	1,425	0,037	0,226	2,26	0,196	14,7	91,3	8,7

Теплофизические свойства хладагента R290 (пропан) в состоянии насыщения

T_n , К	c_p' , кДж/(кг·К)	c_p'' , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$\eta' \cdot 10^6$, Па·с	$\eta'' \cdot 10^6$, Па·с	w' , м/с	w'' , м/с
100	–	0,937	0,207	3,8	3770	3,05	1712	153,6
110	–	0,972	0,203	3,7	2250	3,31	1791	160,4
120	–	1,006	0,199	4,2	1500	3,56	1771	166,9
130	2,014	1,039	0,194	4,7	1080	3,80	1733	173,0
140	2,029	1,071	0,188	5,2	827	4,05	1688	178,9
150	2,032	1,100	0,182	5,7	656	4,29	1638	184,6
160	2,038	1,129	0,176	6,3	536	4,54	1582	190,1
170	2,049	1,158	0,169	6,9	448	4,80	1521	195,3
180	2,067	1,189	0,163	7,5	381	5,06	1456	200,2
190	2,090	1,223	0,156	8,2	329	5,32	1390	204,7
200	2,118	1,263	0,149	8,5	287	5,59	1324	208,8
210	2,152	1,308	0,143	9,6	253	5,87	1258	212,5
220	2,191	1,361	0,136	10,4	224	6,15	1194	215,7
230	2,226	1,409	0,130	11,3	200	6,44	1130	218,3
240	2,284	1,490	0,124	12,2	179	6,73	1067	220,2
250	2,340	1,565	0,118	13,2	160	7,04	1005	221,5
260	2,410	1,649	0,112	14,3	144	7,35	942,7	222,0
270	2,470	1,742	0,107	15,4	130	7,69	880,5	221,6

Окончание табл. П14

$T_n,$ К	$c_p',$ кДж/(кг·К)	$c_p'',$ кДж/(кг·К)	$\lambda',$ Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$\eta' \cdot 10^6,$ Па·с	$\eta'' \cdot 10^6,$ Па·с	$w',$ м/с	$w'',$ м/с
280	2,549	1,844	0,102	16,6	117	8,04	817,9	220,3
290	2,640	1,959	0,0968	18,0	106	8,41	754,4	218,0
300	2,748	2,092	0,0929	19,5	95,1	8,82	689,8	214,6
310	2,880	2,251	0,0872	21,1	85,3	9,26	623,6	209,9
320	3,049	2,455	0,0826	23,1	76,2	9,77	555,6	203,8
330	3,278	2,736	0,0780	25,5	67,5	10,4	485,1	196,3
340	3,624	3,173	0,0738	28,9	59,1	11,1	411,5	187,0
360	6,072	6,438	0,0733	48,2	41,5	13,7	247,5	161,1

Теплофизические свойства хладагента R600a (изобутан) в состоянии насыщения

T_n , К	c_p' , кДж/(кг·К)	c_p'' , кДж/(кг·К)	λ' , Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$\eta' \cdot 10^6$, Па·с	$\eta'' \cdot 10^6$, Па·с	w' , м/с	w'' , м/с
120	100,1	52,63	0,116	3,33	6160,0	3,30	1699,0	142,8
130	101,6	55,28	0,124	3,80	3710,0	3,53	1651,0	147,9
140	103,2	57,85	0,130	4,28	2460,0	3,75	1603,0	152,9
150	104,9	60,31	0,134	4,78	1740,0	3,97	1555,0	157,8
160	106,8	62,69	0,137	5,30	1300,0	4,19	1508,0	162,4
170	108,7	65,03	0,138	5,85	1000,0	4,42	1461,0	166,9
180	101,7	67,37	0,138	6,42	801,0	4,64	1413,0	171,3
190	112,8	69,76	0,137	7,03	654,0	4,87	1366,0	175,4
200	114,9	72,23	0,135	7,67	545,0	5,10	1319,0	179,4
210	117,2	74,81	0,133	8,34	461,0	5,34	1270,0	183,0
220	119,5	77,53	0,129	9,06	395,0	5,58	1221,0	186,5
230	121,9	80,42	0,126	9,83	342,0	5,82	1171,0	189,5
240	124,5	83,49	0,122	10,6	299,0	6,07	1120,0	192,2
250	127,2	86,74	0,117	11,5	263,0	6,33	1069,0	194,5
260	130,0	90,21	0,113	12,4	233,0	6,60	1017,0	196,3
270	133,0	93,90	0,108	13,4	207,0	6,88	963,5	197,6
280	136,3	97,83	0,104	14,4	184,0	7,17	909,7	198,4
290	139,7	102,0	0,0992	15,5	165,0	7,48	855,3	198,5
300	143,4	106,6	0,0948	16,7	148,0	7,80	800,3	197,9

Окончание табл. П15

$T_H,$ К	$c_p',$ кДж/(кг·К)	$c_p'',$ кДж/(кг·К)	$\lambda',$ Вт/(м·К)	$\lambda'' \cdot 10^3,$ Вт/(м·К)	$\eta' \cdot 10^6,$ Па·с	$\eta'' \cdot 10^6,$ Па·с	$w',$ м/с	$w'',$ м/с
310	147,5	111,5	0,0905	17,9	133,0	8,15	744,8	196,5
320	151,9	116,9	0,0864	19,3	120,0	8,52	688,7	194,3
330	157,0	123,1	0,0825	20,7	107,0	8,92	932,2	191,1
340	162,8	130,3	0,0787	22,1	96,2	9,37	575,2	186,8
350	169,8	139,1	0,0750	23,8	86,0	9,87	517,4	181,3
360	178,7	150,5	0,0715	25,5	76,6	10,4	458,6	174,4
370	190,7	166,7	0,0680	27,6	67,6	11,1	398,1	165,9
380	209,4	193,2	0,0646	30,3	58,9	12,0	334,9	155,6
390	246,1	247,3	0,0615	35,0	50,2	13,2	266,8	143,1
400	271,1	432,9	0,0630	48,0	40,4	15,2	189,9	127,8

Теплофизические свойства хладагента R717 (аммиак) в состоянии насыщенной жидкости

$t_H,$ °C	$c_p',$ кДж/(кг·К)	$\lambda',$ Вт/(м·К)	$\alpha' \cdot 10^6,$ м ² /с	$\eta' \cdot 10^5,$ Па·с	$\nu' \cdot 10^6,$ м ² /с	$\sigma \cdot 10^2,$ Н/м	Pr'
-60	4,378	0,600	0,192	–	–	5,14	–
-50	4,404	0,585	0,189	31,5	0,449	4,81	2,37
-40	4,434	0,570	0,186	27,6	0,400	4,48	2,15
-30	4,468	0,554	0,183	24,3	0,358	4,16	1,96
-20	4,506	0,538	0,180	21,6	0,325	3,84	1,81
-10	4,549	0,522	0,176	19,4	0,298	3,53	1,69
0	4,599	0,506	0,172	17,5	0,274	3,23	1,59
10	4,659	0,490	0,168	15,9	0,255	2,93	1,51
20	4,731	0,472	0,164	14,5	0,238	2,64	1,45
30	4,821	0,455	0,159	13,2	0,223	2,34	1,40
40	4,931	0,436	0,153	12,1	0,209	2,06	1,37
50	5,070	0,417	0,146	11,0	0,195	1,77	1,34
60	5,246	0,398	0,139	10,0	0,183	1,49	1,32
70	5,475	0,377	0,131	9,13	0,173	1,22	1,32
80	5,788	0,355	0,121	8,23	0,163	–	1,37
90	6,242	0,338	0,112	7,34	0,152	–	1,36
100	6,971	0,310	0,097	6,45	0,142	–	1,46
110	8,352	0,286	0,080	5,58	0,131	–	1,64
120	11,96	0,259	0,056	4,68	0,121	–	2,16

**Теплофизические свойства хладагента R717 (аммиак)
в состоянии сухого насыщенного пара**

t_H , °C	c_p'' , кДж/(кг·К)	$\lambda'' \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$a'' \cdot 10^6$, м ² /с	$\eta'' \cdot 10^6$, Па·с	$\nu'' \cdot 10^6$, м ² /с	Pr''
-60	2,066	16,00	36,5	–	–	–
-50	2,118	17,00	21,1	7,85	20,636	0,98
-40	2,184	18,00	12,8	8,07	12,533	0,98
-30	2,267	19,18	8,12	8,27	7,996	0,98
-20	2,368	20,44	5,34	8,55	5,321	1,00
-10	2,486	21,90	3,65	8,83	3,677	1,01
0	2,624	23,50	2,57	9,11	2,621	1,02
10	2,783	25,27	1,84	9,40	1,921	1,04
20	2,966	27,08	1,35	9,69	1,443	1,07
30	3,177	29,16	1,01	9,99	1,104	1,09
40	3,424	31,68	0,765	10,3	0,860	1,13
50	3,719	34,54	0,585	10,7	0,680	1,16
60	4,081	37,67	0,449	11,1	0,544	1,21
70	4,545	41,26	0,343	11,6	0,440	1,28
80	5,169	45,55	0,261	12,1	0,358	1,37
90	5,069	51,05	0,232	12,7	0,293	1,26
100	7,495	58,31	0,139	13,5	0,241	1,73
110	10,13	69,56	0,094	14,6	0,199	2,12
120	16,77	88,39	0,052	16,6	0,166	3,19

Таблица П18

Теплофизические свойства хладагента R744 (диоксид углерода) в состоянии насыщенной жидкости

T , К	c_p' , кДж/(кг·К)	c_v' , кДж/(кг·К)	λ' , Вт/(м·К)	$\eta' \cdot 10^5$, Па·с	$\nu' \cdot 10^8$, м ² /с	$a' \cdot 10^6$, м ² /с	Pr'	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м
216	–	–	0,1593	256,0	21,68	–	–	–
220	1,823	0,843	0,1580	238,2	20,42	7,43	2,748	16,34
226	1,837	0,815	0,1246	214,5	18,73	7,37	2,540	14,91
230	1,868	0,816	0,1526	200,4	17,73	7,24	2,453	13,96
236	1,929	0,833	0,1481	181,3	16,39	6,94	2,360	12,57
240	1,975	0,849	0,1447	169,8	15,58	6,72	2,318	11,66
246	2,046	0,874	0,1391	154,2	14,50	6,39	2,268	10,32
250	2,095	0,889	0,1352	144,8	13,84	6,18	2,244	9,44
256	2,177	0,911	0,1292	131,8	12,94	5,83	2,221	8,16
260	2,238	0,924	0,1251	123,7	12,40	5,61	2,213	7,32
266	2,350	0,941	0,1188	112,5	11,63	5,23	2,225	6,11
270	2,444	0,952	0,1146	105,4	11,16	4,96	2,248	5,32
276	2,663	0,968	0,1084	98,35	10,49	4,53	2,315	4,18
280	2,810	0,980	0,1042	88,82	10,06	4,21	2,395	3,46
286	3,216	1,000	0,09784	79,15	9,44	3,63	2,600	2,42
290	3,671	1,019	0,09349	72,60	9,03	3,17	2,851	1,78
296	5,142	1,059	0,08645	62,13	8,39	2,27	3,694	0,90
300	8,228	1,104	0,08077	54,00	7,93	1,44	5,501	0,39
304	–	–	0,07121	41,98	7,34	0,31	23,546	–

Таблица П19

**Теплофизические свойства хладагента R744 (диоксид углерода)
в состоянии сухого насыщенного пара**

T , К	c_p'' , кДж/(кг·К)	c_v'' , кДж/(кг·К)	$\lambda'' \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$\eta'' \cdot 10^6$, Па·с	$\nu'' \cdot 10^8$, м ² /с	$a'' \cdot 10^8$, м ² /с	Pr''
216	–	–	11,42	11,10	81,78	88,46	0,9244
220	0,973	0,675	11,83	11,30	71,14	76,56	0,9294
226	1,012	0,690	12,46	11,61	57,99	61,50	0,9429
230	1,041	0,701	12,91	11,83	50,85	53,30	0,9539
236	1,092	0,719	13,62	12,17	42,08	43,13	0,9757
240	1,131	0,731	14,13	12,41	37,28	37,54	0,9933
246	1,199	0,750	14,96	12,79	31,32	30,56	1,025
250	1,252	0,763	15,57	13,06	28,00	26,67	1,050
256	1,349	0,785	16,58	13,49	23,81	21,68	1,098
260	1,428	0,801	17,34	13,81	21,45	18,86	1,137
266	1,579	0,827	18,64	14,33	18,42	15,17	1,214
270	2,444	0,846	19,64	14,71	16,68	13,02	1,281
276	1,978	0,880	21,41	15,38	14,41	10,14	1,421
280	2,234	0,906	22,84	15,90	13,09	8,42	1,555
286	2,841	0,953	25,54	16,88	11,33	6,03	1,878
290	3,547	0,991	27,91	17,72	10,29	4,57	2,252
296	5,992	1,067	33,05	19,56	8,88	2,50	3,546
300	11,777	1,138	38,83	21,73	8,00	1,21	6,591
303	42,550	1,216	47,25	25,27	7,36	0,32	22,756

Теплофизические свойства хладагента R718 (вода) в состоянии насыщенной жидкости

t_n , °C	c_p' , кДж/(кг·К)	λ' , Вт/(м·К)	$a' \cdot 10^8$, м ² /с	$\eta' \cdot 10^6$, Па·с	$\nu' \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, 1/К	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr'
0	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	-0,63	765,4	13,5
10	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	0,70	741,6	9,45
20	4,183	0,507	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,03
30	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21	712,2	5,45
40	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87	696,5	4,36
50	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	4,49	676,9	3,53
60	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	5,11	662,2	3,08
70	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	5,70	643,5	2,52
80	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	6,32	625,9	2,23
90	4,208	0,676	16,5	314,9	0,326	6,95	607,2	1,97
100	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	4,233	0,685	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	4,250	0,686	17,1	237,1	0,252	8,64	548,4	1,47
130	4,266	0,686	17,3	217,8	0,233	9,19	528,8	1,35
140	4,287	0,685	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,313	0,684	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	4,246	0,681	17,8	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	4,380	0,676	17,2	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,03
190	4,459	0,664	17,2	144,2	0,165	12,6	400,2	0,965

Окончание табл. П20

t_H , °C	c_p' , кДж/(кг·К)	λ' , Вт/(м·К)	$a' \cdot 10^8$, м ² /с	$\eta' \cdot 10^6$, Па·с	$\nu' \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, 1/К	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr'
200	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,932
210	4,555	0,649	16,7	130,5	0,153	14,1	354,1	0,915
220	4,614	0,640	16,5	124,6	0,148	14,8	331,6	0,898
230	4,681	0,629	16,3	119,7	0,145	15,9	310,0	0,888
240	4,76	0,617	16,0	114,8	0,141	16,8	285,5	0,883
250	4,87	0,605	15,5	109,0	0,137	18,1	261,9	0,884
260	4,98	0,593	15,2	105,9	0,135	19,7	237,4	0,892
270	5,12	0,578	14,7	102,0	0,133	21,6	214,8	0,905
280	5,30	0,565	14,3	98,1	0,131	23,7	191,3	0,917
290	5,50	0,548	13,7	94,2	0,129	26,2	168,7	0,944
300	5,76	0,532	13,0	91,2	0,128	29,2	144,2	0,986
310	6,11	0,514	12,2	88,3	0,128	32,9	120,7	1,05
320	6,57	0,494	11,3	85,3	0,128	38,2	98,10	1,14
330	7,25	0,471	10,2	81,4	0,127	43,3	76,71	1,25
340	8,20	0,446	8,95	77,5	0,127	53,4	56,70	1,42
350	10,10	0,431	7,90	72,6	0,126	66,8	38,16	1,70
360	14,65	0,372	4,20	66,7	0,126	109	20,21	2,66
370	40,32	0,338	1,85	56,9	0,126	264	4,709	6,80

Теплофизические свойства хладагента R718 (вода) в состоянии сухого насыщенного пара

t_n , °C	ρ' , м ³ /кг	r , кДж/кг	c_p'' , кДж/(кг·К)	$\lambda'' \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a'' \cdot 10^6$, м ² /с	$\eta'' \cdot 10^6$, Па·с	$\nu'' \cdot 10^6$, м ² /с	Pr''
0	0,00485	2501,0	1,86	1,61	1790	8,75	1805	1,02
10	0,00940	2477,4	1,86	1,69	968	9,15	973,7	1,00
20	0,0173	2453,8	1,86	1,76	548	9,50	549,4	1,00
30	0,0304	2430,2	1,87	1,84	268	9,80	266,7	1,00
40	0,0512	2406,5	1,88	1,93	201	10,30	201,4	1,00
50	0,0830	2382,5	1,91	2,01	127	10,75	129,4	1,02
60	0,130	2358,4	1,93	2,10	83,5	11,20	86,0	1,03
70	0,198	2333,8	1,96	2,20	56,8	11,65	58,8	1,04
80	0,293	2308,9	1,98	2,30	39,6	11,85	41,1	1,04
90	0,423	2283,4	2,02	2,35	27,4	11,90	29,4	1,07
100	0,597	2257,2	2,14	2,37	18,58	12,27	20,02	1,08
110	0,826	2230,0	2,18	2,49	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,121	2202,8	2,21	2,59	10,50	12,85	11,46	1,09
130	1,496	2174,3	2,26	2,69	7,972	13,24	8,85	1,11
140	1,966	2145,0	2,32	2,79	6,130	13,54	6,89	1,12
150	2,547	2114,3	2,40	2,88	4,728	13,93	5,47	1,16
160	3,258	2082,6	2,48	3,01	3,722	14,32	4,39	1,18
170	4,122	2049,5	2,58	3,13	2,939	14,72	3,57	1,21
180	5,157	2015,2	2,71	3,27	2,339	15,11	2,93	1,25
190	6,397	1978,8	2,86	3,42	1,872	15,00	2,44	1,30

Окончание табл. П21

$t_H, ^\circ\text{C}$	$\rho', \text{м}^3/\text{кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$c_p'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda'' \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$a'' \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\eta'' \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu'' \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr''
200	7,862	1940	3,02	3,55	1,492	15,99	2,03	1,36
210	9,588	1900	3,20	3,72	1,214	16,38	1,71	1,41
220	11,62	1857	3,41	3,90	0,983	16,87	1,45	1,47
230	13,99	1813	3,63	4,09	0,806	17,36	1,24	1,54
240	16,76	1766	3,88	4,29	0,658	17,75	1,06	1,61
250	19,98	1716	4,16	4,52	0,544	18,24	0,913	1,68
260	23,72	1661	4,47	4,80	0,453	18,83	0,794	1,75
270	28,09	1604	4,82	5,12	0,378	19,32	0,688	1,82
280	33,19	1543	5,23	5,49	0,317	19,91	0,600	1,90
290	39,15	1476	5,69	5,83	0,261	20,59	0,526	2,01
300	46,21	1404	6,28	6,27	0,216	21,28	0,461	2,13
310	54,58	1325	7,12	6,84	0,176	21,97	0,403	2,29
320	64,72	1238	8,21	7,51	0,141	22,85	0,353	2,50
330	77,10	1140	9,88	8,26	0,108	23,93	0,310	2,86
340	92,76	1027	12,35	9,30	0,0811	25,20	0,272	3,35
350	113,6	893	16,24	10,70	0,0581	26,58	0,234	4,03
360	144,0	720	23,03	12,79	0,0386	29,13	0,202	5,23
370	203,0	438	56,52	17,10	0,0150	33,73	0,166	11,10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филиппов Л.П.** Методы расчета и прогнозирования свойств веществ. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 252 с.
2. **Перельштейн И.И., Парушин Е.Б.** Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. – М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1984. – 232 с.
3. **Железный В.П.** Термодинамические свойства озонобезопасных хладагентов, их смесей с маслами (Эксперимент, методы прогнозирования, проблемы экологии): Дис. ... д-ра. техн. наук/ Одесса: ОТИХП, 2002. – 441 с,
4. Теплофизические свойства фреонов. Т. 2. Фреоны метанового ряда: Справ. данные/ В.В. Алтунин, В.З. Геллер, Е.А. Кременевская и др.; Под ред. С.Л. Ривкина – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 264 с.
5. **Stiel R.I., Thodos G.** Progress in international research on thermodynamics and transport properties. – N.-Y, 1962. – 352 p.
6. **Голубев И.Ф.** Вязкость газов и газовых смесей. – М.: Физматгиз, 1959. – 376 с.
7. **Бадылькес И.С.** Рабочие вещества и процессы холодильных машин. – М.: Госторгиздат, 1962. – 280 с.
8. **Цветков О.Б.** Теплопроводность холодильных агентов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. – 220 с.
9. **Александров А.А., Григорьев Б.А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 168 с.
10. Холодильная техника. Кондиционирование. Свойства веществ. Справ. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова; Под ред. С.Н. Богданова. – СПб.: СПбГАХИПТ, 1999. – 320 с.
11. **Клецкий А.В.** Таблицы термодинамических свойств газов и жидкостей. Вып. 4. Аммиак. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 78 с.
12. **Цветков О.Б., Клецкий А.В., Лаптев Ю.А.** Теплофизические свойства и диаграммы альтернативных холодильных агентов: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГАХИПТ, 1997. – 96 с.
13. **Алтунин В.В.** Теплофизические свойства двуокиси углерода. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 552 с.
14. Термодинамические свойства пропана / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, В.А. Цымарный. – М.: Изд-во стандартов, 1989. 268 с.

15. **Younglove B.A., Ely J.F.** Thermophysical properties of fluids. II. Methane, ethane, propane, isobutene and normal butane // J. Phys. Ref. Data. – 1987. – Vol. 16, N 40. – P. 577–798.

16. **Клецкий А.В.** Таблицы термодинамических свойств газов и жидкостей. Вып. 2. Фреон 22. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 60 с.

17. 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.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	6
1. РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	7
1.1. Термодинамические свойства	7
1.2. Кинетические коэффициенты	10
2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ.....	21
2.1. Термодинамические свойства	21
2.2. Кинетические коэффициенты	30
ПРИЛОЖЕНИЕ	40
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	69

Цветков Олег Борисович
Лаптев Юрий Александрович
Баранцов Антон Андреевич

РАСЧЕТ СВОЙСТВ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Е.О. Трусова

Компьютерная верстка
Ю.А. Лаптев

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

Печатается
в авторской редакции

Подписано в печать 27.06.2016. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 4,19. Печ. л. 4,5. Уч.-изд. л. 4,25
Тираж 100 экз. Заказ № С 33

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

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