

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

**СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
ПО КУРСУ «ТЕПЛОМАССОБМЕН»**

Учебное пособие

Иваново 2017

УДК 621.1.016
Б94

Бухмиров В.В., Ракутина Д.В. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2017. – 120 с.

Приведены справочные материалы, необходимые для решения задач при проведении практических занятий, контрольных и экзаменационных работ, а также для самостоятельной работы студентов.

Пособие содержит таблицы физических свойств газов, жидкостей, жидких металлов и твердых веществ; формулы, таблицы и номограммы для расчета нестационарной теплопроводности в телах простой формы; критериальные формулы для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи и графические материалы по разделам «Радиационный теплообмен» и «Теплообменные аппараты» курса «Тепломассообмен».

Учебное пособие предназначено для студентов изучающих курсы «Теплотехника» и «Тепломассообмен».

Табл. 86. Ил. 23. Библиогр.: 17 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент И.М. Чухин

кафедра теоретических основ теплотехники ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

СОДЕРЖАНИЕ

Основные обозначения.....	5
1. Физические свойства веществ	7
1.1. Физические свойства твердых тел.....	7
1.2. Физические свойства жидкостей.....	53
1.3. Физические свойства газов	60
1.4. Физические свойства воды и водяного пара	69
2. Расчет нестационарной теплопроводности в телах простейшей формы.....	73
3. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи в однофазных текучих средах	89
3.1. Конвективная теплоотдача при свободном движении текучей среды	89
3.1.1. Теплоотдача при свободной конвекции около вертикальных пластин и вертикальных труб (формулы В.П. Исаченко)	89
3.1.2. Теплоотдача при свободной конвекции около горизонтальных пластин (формулы В.П. Исаченко)	90
3.1.3. Теплоотдача при свободном движении текучей среды при малых числах Рэлея ($Ra_{md} < 1$).....	91
3.1.4. Теплоотдача при свободной конвекции около горизонтальных цилиндров (труб) (формула И.М. Михеевой)	91
3.1.5. Теплоотдача при свободной конвекции около вертикальных пластин, вертикальных труб, горизонтальных пластин, горизонтальных труб и шаров (формула М.А. Михеева)	92
3.1.6. Теплообмен при свободном движении текучей среды в ограниченном пространстве	92
3.2. Конвективная теплоотдача при вынужденном движении текучей среды в трубах и каналах	94
3.2.1. Теплоотдача при движении флюида в прямых гладких трубах	94
3.2.2. Теплоотдача при движении флюида в каналах произвольного поперечного сечения	98
3.2.3. Теплоотдача при турбулентном движении флюида в изогнутых трубах	99
3.3. Конвективная теплоотдача при вынужденном внешнем обтекании тел	99
3.3.1. Продольное обтекание пластины и внешней поверхности трубы	99
3.3.2. Теплоотдача при поперечном обтекании одиночной трубы	100
3.3.3. Теплоотдача при поперечном обтекании трубного пучка	102
4. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи при конденсации и кипении	104

4.1. Теплоотдача при конденсации паров	104
4.1.1. Пленочная конденсация на вертикальной поверхности	104
4.1.2. Пленочная конденсация на наклонной поверхности	105
4.1.3. Пленочная конденсация на горизонтальной трубе	106
4.2. Теплоотдача при кипении жидкостей	107
4.2.1. Пузырьковое кипение в большом объеме	107
4.2.2. Пленочное кипение в большом объеме	107
4.2.3. Расчет кризисов кипения	107
4.2.4. Расчет теплоотдачи при кипении в трубах и каналах	108
5. Расчет средней разности температур при сложном движении теплоносителей в рекуперативном теплообменном аппарате	109
6. Расчет степени черноты двухатомных газов	112
Перечень таблиц.....	116
Справочная литература	119

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $a = \lambda / (\rho \cdot c)$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
- c – удельная массовая теплоемкость, измеренная при постоянном давлении (c_p) или постоянном объеме (c_v), $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;
- c' – удельная объемная теплоемкость, измеренная при постоянном давлении (c'_p) или постоянном объеме (c'_v), $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;
- h – удельная энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$;
- h' – удельная энтальпия кипящей жидкости, $\text{кДж}/\text{кг}$;
- h'' – удельная энтальпия сухого насыщенного пара, $\text{кДж}/\text{кг}$;
- r – удельная теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$;
- μ – молярная масса вещества, $\text{кг}/\text{кмоль}$; динамический коэффициент вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$;
- p – давление, Па ;
- $Q_{\text{пл}}$ – удельная теплота плавления, $\text{кДж}/\text{кг}$;
- T – температура вещества, K ;
- t – температура вещества, $^\circ\text{C}$;
- $T_{\text{кип}}, t_{\text{кип}}$ – температура кипения, K или $^\circ\text{C}$;
- $T_{\text{пл}}, t_{\text{пл}}$ – температура плавления, K или $^\circ\text{C}$;
- V – объем вещества, м^3 ;
- v – удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$;
- W – влажность массовая, %;
- x – степень сухости пара;
- β – коэффициент объемного расширения вещества, $1/\text{K}$;
- α_t – коэффициент линейного расширения вещества, $1/^\circ\text{C}$;
- $k = c_p/c_v$ – коэффициент Пуассона (показатель адиабаты);
- δ – относительное удлинение, %;
- ε – деформация под нагрузкой, %;
- λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ или $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$;
- $\nu = \mu / \rho$ – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;
- ψ – относительное сужение, %;
- ρ – плотность вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$;
- ρ' – плотность кипящей воды, $\text{кг}/\text{м}^3$;
- ρ'' – плотность сухого насыщенного пара, $\text{кг}/\text{м}^3$;
- ρ_s – удельное электрическое сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;
- σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Н}/\text{м}$;
- σ_b – предел прочности при растяжении, $\text{Н}/\text{м}^2$;
- $\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности, $\text{Н}/\text{м}^2$;
- $\sigma_{\text{пл}}$ – предел ползучести, $\text{Н}/\text{м}^2$;
- σ_t – предел текучести, $\text{Н}/\text{м}^2$;
- E – модуль упругости, $\text{Н}/\text{м}^2$;
- HB – твердость по Бринеллю, $\text{Н}/\text{м}^2$;
- $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$ – критерий Фурье;

$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}$ – критерий Био;

$Nu = \frac{\alpha \cdot R_0}{\lambda}$ – критерий (число) Нуссельта;

$Gr = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T_0$ – критерий Грасгофа;

$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$ – критерий Прандтля;

$Ra = Gr \cdot Pr$ – критерий Рэлея;

$Re = \frac{w_0 \cdot R_0}{\nu} = \frac{\rho \cdot w_0 \cdot R_0}{\mu}$ – критерий Рэйнольдса;

$Pe = \frac{w_0 \cdot R_0}{a} = Re \cdot Pr$ – критерий Пеклэ;

$\Theta''' = (T_f - T)/(T_f - T_0)$ – относительная безразмерная температура тела при граничных условиях 3 рода;

τ – время, с;

R – характерный размер тела (пластины, цилиндра или шара), м;

$R = \delta/2$ – при двустороннем симметричном нагреве (охлаждении) пластины, м;

$R = \delta$ – при одностороннем нагреве (охлаждении) пластины, м;

$R = r_n$ – характерный размер цилиндра или шара, м;

R_0 – определяющий размер в задачах конвективного теплообмена, м;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C) или Вт/(м²·K);

T_f – температура текучей среды (жидкости, газа), омывающей тело, K или °C.

Индексы:

кип – параметры вещества при температуре кипения;

кр – параметры вещества в критическом состоянии;

0 – начальные значения параметров или значения параметров при нормальных условиях ($t = 0$ °C, $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па);

пл – параметры вещества при температуре плавления;

p – значение параметра при постоянном давлении;

v – значение параметра при постоянном объеме;

m – усредненные параметры вещества.

Условные обозначения химических элементов:

Al – алюминий;

Ba – барий;

Be – бериллий;

B – бор;

V – ванадий;

Bi – висмут;

W – вольфрам;

Ga – галлий;

Fe – железо;

Au – золото;

I – иод;

Ir – иридий;

Cd – кадмий;

K – калий;

Ca – кальций;

Co – кобальт;

Si – кремний;

Li – литий;

Mg – магний;

Mn – марганец;

Cu – медь;

Mo – молибден;

As – мышьяк;

Na – натрий;

Nd – неодим;

Ni – никель;

Nb – ниобий;

Sn – олово;

Os – осмий;

Pd – палладий;

Pt – платина;

Re – рений;

Rh – родий;

Rb – рубидий;

Pb – свинец;

Se – селен;

S – сера;

Ag – серебро;

Sb – сурьма;

Tl – таллий;

Ta – тантал;

Te – теллур;

Ti – титан;

Th – торий;

C – углерод;

U – уран;

P – фосфор;

Cr – хром;

Cs – цезий;

Ce – церий;

Zn – цинк;

Zr – цирконий.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

1.1. Физические свойства твердых тел

Таблица 1.1

Плотность (ρ), коэффициент теплопроводности (λ) и удельная теплоемкость (c) строительных, теплоизоляционных и других материалов [2]

Материалы	ρ , кг/м ³	t , °C	λ , Вт/(м·°C)	c , кДж/(кг·°C)
Альфонь при толщине воздушных слоев	–	–	$0,0302+0,85 \cdot 10^{-4}t$	–
Асбест распушенный:				
3–й сорт	340	–	$0,087+0,24 \cdot 10^{-3}t$	0,816
6–й сорт	650	–	$0,11+0,19 \cdot 10^{-3}t$	0,816
Асбестовый картон	900	–	$0,16+0,17 \cdot 10^{-3}t$	0,816
Асбестовый шнур	800	–	$0,13+0,15 \cdot 10^{-3}t$	0,816
Асбошифер:				
с высоким содержанием асбеста	1800	20	0,17 – 0,35	–
с 10 – 50% асбеста (сухой)	1800	20	0,64 – 0,52	–
Асфальт	2120	0–30	0,60–0,74	1,67
Бетон с каменным щебнем	2000	0	1,28	0,84
То же сухой	1600	0	0,84	–
Железобетон набивной	2200	0	1,55	0,84
Шлакобетон	1500	0	0,7	0,8
Бумага обыкновенная	–	20	0,14	1,51
Вата хлопчатобумажная	80	30	0,042	–
Гипс (формованный сухой)	1250	20	0,43	0,8–0,92
Глина	2000–1600	20	0,9–0,7	0,84
Глина огнеупорная	1845	450	1,04	1,09
Гравий	1840	20	0,36	–
Дельта–древесина	–	35–70	0,21	–
Дерево:				
дуб поперек волокон	825	0–15	0,20–0,21	2,39
дуб вдоль волокон	819	дек.50	0,35–0,43	2,39
сосна поперек волокон	546	0–50	0,14–0,16	2,72
сосна вдоль волокон	–	20–25	0,35–0,72	2,72
Каменный уголь:				
газовый	1420	20–100	3,6–4,0	–
обыкновенный твердый	1200–1350	20	0,24–0,27	–
Каменноугольная пыль	730	30–150	0,12–0,13	–
Картон	–	20	0,14–0,35	1,51
Кембрик (лакированный)	–	38	0,157	–
Кирпич:				
красный машинной формовки	1800	0	0,77	0,88
красный ручной формовки	1700	0	0,7	0,88
силикатный	1900	0	0,81	0,84

Материалы	ρ , кг/м ³	t , °C	λ , Вт/(м°C)	c , кДж/(кг°C)
Кладка из красного кирпича:				
на холодном растворе	1700	0	0,81	0,88
на теплом растворе	1600	0	0,67	0,84
Кладка из силикатного кирпича:				
на холодном растворе	1900	0	0,87	0,84
на теплом растворе	1700	0	0,76	0,8
Кладка бутовая из камней средней плотности	2000	0	1,28	0,88
Карболит черный	1150	50	0,231	–
Кожа	–	20	0,14–0,16	–
Кокс порошкообразный	449	100	0,191	1,21
Котельная накипь:				
богатая гипсом	2000–2700	100	0,7–2,3	–
богатая известью	1000–2500	100	0,15–2,3	–
богатая силикатом	300–1200	100	0,08–0,23	–
Кварц кристаллический:				
поперек оси	–	0	0,72	–
вдоль оси	–	0	1,94	–
Ламповая сажа	165	40	0,07–0,12	–
Лед	917	0	2,2	2,26
Лед	928	–100	3,5	1,17
Льняная ткань	–	–	0,088	–
Магнезия в форме сегментов для изоляции труб	266	50–200	0,073–0,084	–
Мел	2000	50	0,9	0,88
Миканит	–	20	0,21–0,41	–
Мрамор	2800	0	3,5	0,92
Парафин	920	20	0,27	–
Песок речной мелкий (сухой)	1520	0–160	0,30–0,38	0,8
Песок речной мелкий (влажный)	1650	20	1,13	2,09
Прессшпан	–	20–50	0,26–0,22	–
Плексиглас	–	20	0,184	–
Пробковые плиты сухие	148–198	80	0,042–0,053	1,76
Пробковая мелочь, величина куска 4–5мм	85	0–60	0,044–0,058	1,76
Резина:				
твердая обыкновенная	1200	0–100	0,157–0,160	1,38
мягкая	–	20	0,13–0,16	1,38
Сахарный песок	1600	0	0,58	1,26
Сера ромбическая	–	21	0,28	0,762
Сланец	–	94	1,49	–
Слюда (поперек слоев)	2600–3200	20	0,49–0,58	–

Материалы	ρ , кг/м ³	t, °C	λ , Вт/(м·°C)	c, кДж/(кг·°C)
Снег:				
свежевыпавший	200	–	0,1	2,09
уплотненный	400	–	0,46	2,09
Стекло:				
зеркальное	2550	0–100	0,78–0,88	0,779
обыкновенное	2500	20	0,74	0,67
термометрическое	2590	20	0,96	–
пирекс	–	0	1,04	–
то же	–	400	1,55	–
кварцевое	–	400	1,76	–
то же	–	800	2,4	–
то же	–	1200	3,05	–
Стекланная вата	154–206	88	0,051–0,059	–
Текстолит	1300– 1400	20	0,23–0,34	1,46–1,51
Фарфор	2400	95	1,04	1,09
То же	2400	1055	1,96	1,09
Фибра красная	1290	20–100	0,46–0,50	–
Фибролит	360–440	80	0,073–0,128	–
Целлулоид	1400	30	0,21	–
Шелк	100	0–93	0,043–0,06	–
Эбонит	1200	20	0,157–0,17	–
Шлак:				
котельный	1000	0	0,29	0,75
доменный гранулированный	50	0	0,15	0,75
Штукатурка:				
известковая	1600	0	0,7	0,84
цементно–песчаная	1800	0	1,2	0,84
Фанера клееная	600	0	0,15	2,51
Уголь древесный кусковой	190	80	0,074	–

Таблица 1.2

Плотность (ρ), коэффициент теплопроводности (λ), удельная теплоемкость (c) и максимальная рабочая температура (t) для основных огнеупорных изделий [2]

Наименование огнеупора	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	λ , Вт/(м·°C)	c, кДж/(кг·°C)	t, °C
Шамотный кирпич	1,8–1,9	0,84+0,0006 · t	0,88+0,00230 · t	1350–1450
Пеношамот	0,95	0,28+0,00023 · t	–	1350
Пеношамот	0,6	0,10+0,000145 · t	–	1300
Кирпич:				
динасовый	0,9–1,95	0,9+0,0007 · t	0,8+0,00025 · t	1700
магнезитовый	2,6–2,8	4,65 – 0,0017 · t	1,05+0,0003 · t	1650–1700
хромомagneзитовый	2,75–2,85	1,86–1,98 (0–600 °C)	–	1700
хромитовый	3,0–3,1	1,3+0,00041 · t	0,8+0,0003 · t	1650–1700

Наименование огнеупора	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	λ , Вт/(м ² ·°C)	c , кДж/(кг·°C)	t , °C
Изделия:				
силлиманитовые (муллитовые)	2,2–2,4	1,69 – 0,00023 · t	0,8+0,00025 · t	1650
корундовые (алундовые)	2,3–2,6	2,09+0,0019 · t	0,80+0,0004 · t	1600–1700
циркониевые	3,3	1,30+0,00064 · t	0,54 – 0,00012 · t	1750–1800
карборундовые (карбофракс)	2,3–2,6	21 – 0,010 · t	0,96+0,000146 · t	1400–1500
угольные	1,35–1,6	23+0,035 · t (до 1000 °C)	0,8	2000
графитовые	1,6	163 – 0,041 · t	0,8	2000

Таблица 1.3

Плотность (ρ), коэффициент теплопроводности (λ) и предельная температура применения (t) основных изоляционных материалов и изделий [2]

Наименование материала или изделия	ρ , кг/м ³		λ , Вт/(м ² ·°C)	t , °C
	в порошке	в мастичной конструкции		
Изоляционные материалы				
Асбест пушенный 6–ого сорта	800	–	0,130+0,00019t	700
Асбозонолит	350	500–550	0,143+0,00019t	700
Асбозурит	450	700	0,1622+0,000169t	200–300
Асбослюда	400–500	580–650	0,120+0,000148t	600
Асботермит	400–430	550–270	0,109+0,000145t	500–550
Диатомит молотый	400–500	–	0,091+0,00028t	800
Зонолит (вермикулит)	150–250	–	0,072+0,00262t	900–1100
Минеральная вата	180–250	–	0,046–0,058 при 50 °C	500
Новоасбозурит	400–450	580–650	0,144+0,00014t	250
Ньювельт	180–200	405–465	0,87+0,000064t	325–370
Совелит	230–250	440–520	0,0901+0,000087t	400–450
Торфяная крошка	200–350	–	0,06–0,08	100
Ферригипс (паста феррон)	–	400–550	0,07–0,08	650
Шлаковая вата (сорт 0)	170–200	–	0,06+0,000145t	750
Изоляционные изделия				
Вермикулитовые плиты	–	350–380	0,081+0,00015t	700–750
Вулканитовые плиты	–	400	0,080+0,00021t	550–600
Войлок строительный	–	300	0,05 при 0 °C	90
Диатомовый кирпич	–	500–600	0,113+0,00023t	850
Диатомовые скорлупы и сегменты	–	500–600	0,113+0,00023t	850
Изделия «новоизоль»	–	400–450	0,073+0,00028t	400
Камышитовые плиты	–	560–360	0,10 при 0 °C	100
Минеральный войлок	–	250–300	0,058–0,076 при 50 °C	–
Пенобетонные блоки	–	400–500	0,099–0,122 при 50 °C	300
Пенодиатомовый кирпич	–	230–430	0,07–0,09 при 70 °C	600–800
Пеностекло (газостекло)	–	290–450	0,124–0,160 при 70 °C	600–800
Плиты «оргизоль»	–	280–350	0,078+0,00012t	600
Пробковые плиты	–	250	0,07 при 0 °C	120
Совелитовые плиты	–	400–450	0,079+0,00019t	450–500
Соломитовые маты	–	260–360	0,10 при 0 °C	100
Торфоплиты	–	170–250	0,046+0,00014t	100–120
Шлаковая и минеральная пробка	–	270–350	0,064–0,081 при 50 °C	150

Таблица 1.4

Коэффициент теплопроводности сталей (λ , Вт/(м $^{\circ}$ С)) [2]

Наименование и марка стали	Температура, $^{\circ}$ С								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Углеродистая 15	54,4	50,2	46,0	41,9	37,7	33,5	–	–	–
Углеродистая 30	50,2	46,0	41,9	37,7	33,5	29,3	–	–	–
Хромомолибденовая X10C2M (ЭИ107)	18,4	–	21,7	–	–	24,6	25,5	–	–
Хромоникельвольфрамовая 4X14НВ2М (ЭИ69)	15,5	16,9	19,2	20,2	21,2	22,0	–	–	–
Хромоникелевая 1X18Н9Т (ЭЯ1Т)*	16,0	17,6	19,2	20,8	22,3	23,8	25,5	27,6	–
Хромоникелевая X25Н20С2 (ЭИ283)	14,6	–	–	–	21,6	23,5	25,1	27,1	28,8
Хромистая нержавеющая:									
1X13 (Ж ₁)	24,0	23,6	23,3	23,3	23,7	24,4	–	–	–
2X13 (Ж ₂)	24,3	25,8	26,3	26,4	26,6	26,4	26,2	26,7	27,6
3X13 (Ж ₃)	25,1	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	24,6	–	–
4X13 (Ж ₄)	28,0	29,1	29,3	29,2	28,8	28,4	28,0	–	–
X17 (Ж ₁₇)	24,4	–	–	–	–	–	–	–	–
X28 (Ж ₂₇)	20,9	21,7	22,7	23,4	24,3	25,0	–	–	–

Примечание: * Значения λ для различных образцов стали 1X18Н9Т изменяются в пределах $\pm 20\%$.
Здесь приведены средние значения λ .

Таблица 1.5

Коэффициент теплопроводности (λ , Вт/(м $^{\circ}$ С)) металлов и сплавов [2]

Наименование металла или сплава	Температура, $^{\circ}$ С							
	0	20	100	200	300	400	500	600
Алюминий	202	–	206	229	272	319	371	422
Алюминиевые сплавы:								
92% Al, 8% Mg	102	106	123	148	–	–	–	–
80% Al, 20% Si	158	160	169	174	–	–	–	–
Дюралюминий:								
94 – 96% Al, 3 – 5% Cu, 0,5% Mg	159	165	181	194	–	–	–	–
Латунь:								
90% Cu, 10% Zn	102	–	117	134	149	166	180	195
70% Cu, 30% Zn	106	–	109	110	114	116	120	121
67% Cu, 33% Zn	100	–	107	113	121	128	135	151
60% Cu, 40% Zn	106	–	120	137	152	169	186	200
Медь (99,9%)	393	–	385	378	371	365	359	354
Монель–металл:								
29% Cu, 67% Ni, 2% Fe	–	22,1	24,4	27,6	30	34	–	–
Нейзильбер:								
62% Cu, 15% Ni, 22% Zn	–	25,0	31	40	45	49	–	–
Нихром:								
90% Ni, 10% Cr	17,1	17,4	19,0	20,9	22,8	24,6	–	–
80% Ni, 20% Cr	12,2	13,6	13,8	15,6	17,2	19,0	–	22,6
Нихром железистый:								
61%Ni, 15% Cr, 20% Fe, 4% Mn	–	11,6	11,9	12,2	12,4	12,7	–	13,1
61%Ni, 16% Cr, 23% Fe	11,9	12,1	13,2	14,6	16,0	17,4	–	–
Сталь мягкая	63	–	57	52	46	42	36	31

Таблица 1.6

Коэффициент теплопроводности сплавов (λ) [2]

Сплав	t, °C	λ , Вт/(м·°C)
Алюминиевая бронза : 95% Cu, 5% Al	20	82
Бронза:		
90% Cu, 10% Sn	20	42
75% Cu, 25% Sn	20	26
88% Cu, 10% Sn, 2% Zn	20	48
Бронза фосфористая:		
92,8% Cu, 5% Sn, 0,15% P, 2% Zn	20	79
91,7% Cu, 8% Sn, 0,3% P	20	45
87,2% Cu, 12,4% Sn, 0,4% P	20	36
Инвар: 35% Ni, 65% Fe	20	11,0
Константан:		
60% Cu, 40% Ni	20	22,7
60% Cu, 40% Ni	100	25,6
Манганин:		
84% Cu, 4% Ni, 12% Mn	20	21,3
84% Cu, 4% Ni, 12% Mn	100	26,4
Магниевые сплавы:		
92% Mg, 8% Al	20–200	62–79
88% Mg, 10% Al, 2% Si	20–200	58–76
92% Mg, 8% Cu	20–200	126–132
Медные сплавы:		
70% Cu, 30% Mn	20	13
90% Cu, 10% Ni	20–100	58–76
80% Cu, 20% Ni	20–100	34–41
40% Cu, 60% Ni	20–100	22–26
Металл Розе: 50% Bi, 25% Pb, 25% Sn	20	16
Металл Вуда: 48% Bi, 26% Pb, 13% Sn, 13% Cd	20	13
Никелевые сплавы:		
70% Ni, 28% Cu, 2% Fe	20	35
62% Ni, 12% Cu, 26% Fe	20	13,5
Никелевое серебро	0	29,3
То же	100	37
Платиноиридий: 90% Pt, 10% Ir	0–100	30,9–31
Электрон: 93% Mg, 4% Zn, 0,5% Cu	20	116
Платинородий: 90% Pt, 10% Rh	0–100	30–30,6

Таблица 1.7

**Коэффициент теплопроводности (λ , Вт/(м·°С)) углеродистых сталей
в зависимости от температуры [1]**

Температура, °С	Марки стали						
	08кп	8	20	40	У8	У8'	У12
0	65,1	59,5	51,9	51,9	49,8	51,1	45,2
50	62,8	58,6	51,5	51,5	49,4	50,2	45,2
100	60,2	57,7	51,1	50,6	48,1	48,9	44,8
150	57,7	55,2	49,9	49,8	46,9	47,7	42,4
200	55,6	53,5	48,5	48,1	45,1	46,1	42,7
250	53,0	51,5	46,5	46,9	43,0	43,9	41,1
300	50,9	49,4	44,4	45,6	41,4	41,9	40,2
350	48,5	47,7	43,6	44,3	40,2	40,2	38,5
400	46,5	44,8	42,7	41,9	38,1	37,6	37,2
450	43,5	42,3	41,1	40,0	36,4	36,9	36,1
500	41,1	40,2	39,3	38,1	35,2	35,6	34,7
550	39,4	38,1	37,7	36,1	33,9	34,4	33,5
600	37,4	36,1	35,6	33,6	32,7	33,3	31,9
650	36,1	33,9	33,9	31,9	31,4	31,9	30,0
700	33,9	31,9	31,9	30,0	30,1	30,7	28,3
750	31,9	29,8	28,5	26,9	26,9	27,3	26,9
800	30,1	28,5	25,9	24,8	24,3	24,3	23,7
850	27,7	27,2	25,9	24,8	24,3	24,3	23,7
900	27,2	26,7	26,4	25,7	25,7	25,2	24,8
950	27,2	27,2	27,2	26,1	26,5	26,1	25,7
1000	27,7	27,7	27,7	26,9	26,9	26,9	26,1
1050	28,0	28,0	28,0	27,2	27,7	27,7	26,9
1100	28,5	28,5	28,5	28,0	28,6	28,6	27,2
1150	29,3	29,3	29,3	28,7	29,4	28,7	28,0
1200	29,8	29,8	29,8	29,5	30,2	29,5	28,6

Таблица 1.8

**Средняя удельная теплоемкость (c_m , кДж/(кг·°С)) углеродистых сталей
различных марок в интервале температур от 50 до t °С [1]**

Температура, °С	Углеродистые стали							
	Чистое железо (99,99%)	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
100	0,469	0,486	0,486	0,486	0,486	0,486	0,502	0,486
150	0,477	0,594	0,494	0,494	0,494	0,502	0,511	0,502
200	0,489	0,502	0,502	0,502	0,498	0,515	0,523	0,815
250	0,498	0,511	0,511	0,511	0,507	0,523	0,523	0,523
300	0,511	0,519	0,519	0,519	0,515	0,532	0,519	0,532
350	0,519	0,528	0,528	0,528	0,523	0,540	0,544	0,540
400	0,528	0,536	0,540	0,540	0,532	0,548	0,553	0,544
450	0,536	0,548	0,548	0,548	0,544	0,557	0,565	0,557
500	0,553	0,561	0,561	0,561	0,557	0,589	0,574	0,565
550	0,561	0,574	0,578	0,574	0,569	0,582	0,586	0,578

Температура, °С	Углеродистые стали							
	Чистое железо (99,99%)	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
600	0,578	0,590	0,590	0,590	0,582	0,595	0,503	0,586
650	0,595	0,611	0,607	0,607	0,595	0,603	0,615	0,599
700	0,615	0,628	0,628	0,628	0,607	0,619	0,632	0,615
750	0,641	0,645	0,662	0,669	0,678	0,724	0,745	0,720
800	0,657	0,678	0,682	0,703	0,674	0,716	0,737	0,716
850	0,666	0,682	0,695	0,703	0,662	0,712	0,729	0,712
900	0,666	0,695	0,703	0,703	0,657	0,708	0,724	0,708
950	0,682	0,691	0,609	0,699	0,653	0,703	0,716	0,703
1000	0,678	0,691	0,695	0,695	0,653	0,699	0,712	0,699
1050	0,669	0,691	0,695	0,691	0,653	0,695	0,708	0,695
1100	0,666	0,691	0,695	0,691	0,649	0,695	0,703	0,695
1150	0,666	0,687	0,691	0,691	0,649	0,691	0,707	0,691
1200	0,666	0,687	0,691	0,687	0,649	0,691	0,699	0,691
1250	0,662	0,687	0,691	0,687	0,653	0,691	0,699	0,691
1300	0,662	0,699	0,687	0,687	0,653	0,691	0,699	0,687

Таблица 1.9
Средняя удельная теплоемкость (c_m , кДж/(кг·°С)) углеродистых сталей [1]

Интервал температур, °С	Углеродистые стали							
	Чистое железо (99,99%)	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
50–100	0,469	0,481	0,481	0,486	0,486	0,489	0,498	0,486
100–150	0,489	0,502	0,502	0,507	0,502	0,519	0,523	0,519
150–200	0,511	0,519	0,523	0,519	0,515	0,532	0,544	0,540
200–250	0,528	0,536	0,544	0,532	0,528	0,548	0,548	0,544
250–300	0,544	0,553	0,557	0,557	0,548	0,565	0,565	0,557
300–350	0,565	0,574	0,569	0,574	0,569	0,586	0,552	0,578
350–400	0,586	0,595	0,595	0,599	0,586	0,607	0,603	0,599
400–450	0,611	0,624	0,624	0,624	0,611	0,628	0,632	0,615
450–500	0,649	0,662	0,662	0,662	0,649	0,669	0,666	0,636
500–550	0,691	0,708	0,695	0,703	0,691	0,695	0,708	0,662
550–600	0,733	0,754	0,741	0,749	0,708	0,716	0,749	0,699
600–650	0,775	0,799	0,791	0,787	0,733	0,720	0,779	0,745
650–700	0,829	0,867	0,858	0,846	0,770	0,770	0,833	0,816
700–750	0,971	1,105	1,139	0,432	1,583	2,081	2,186	2,089
750–800	0,913	0,875	0,959	0,950	0,624	0,615	0,632	0,649

Интервал температур, °С	Углеродистые стали							
	Чистое железо (99,99%)	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
800–850	0,754	0,795	0,867	0,737	0,502	0,657	0,619	0,657
850–900	0,716	0,849	0,716	0,649	0,548	0,619	0,619	0,619
900–950	0,946	0,662	0,649	0,649	0,624	0,624	0,619	0,619
950–1000	0,557	0,669	0,657	0,649	0,624	0,632	0,615	0,628
1000–1050	0,582	0,669	0,657	0,649	0,632	0,645	0,628	0,636
1050–1100	0,599	0,669	0,662	0,649	0,632	0,653	0,636	0,641
1100–1150	0,615	0,669	0,662	0,657	0,641	0,662	0,653	0,649
1150–1200	0,632	0,669	0,666	0,666	0,653	0,669	0,669	0,657
1200–1250	0,649	0,669	0,666	0,678	0,669	0,678	0,78	0,666
1250–1300	0,669	0,669	0,666	0,687	0,687	0,678	0,695	0,674

Таблица 1.10

Плотность углеродистых сталей (ρ , кг/м³) [1]

Температура, °С	Углеродистые стали					
	08кп	08	20	40	У8	У12
0	7876	7861	7863	7858	7855	7834
15	7871	7856	7859	7854	7851	7830
50	7861	7847	7849	7845	7842	7822
100	7846	7832	7834	7832	7829	7809
150	7830	7846	7819	7817	7815	7796
200	7814	7800	7803	7801	7800	7781
250	7798	7783	7787	7784	7784	7765
300	7781	7765	7770	7766	7767	7749
350	7763	7748	7753	7748	7749	7731
400	7745	7730	7736	7730	7731	7713
450	7727	7711	7718	7711	7713	7694
500	7708	7692	7699	7692	7694	7675
550	7688	7673	7679	7672	7675	7655
600	7668	7653	7659	7652	7655	7634
650	7648	7632	7635	7628	7632	7613
700	7628	7613	7617	7613	7612	7592
750	7610	7594	7620	7624	7604	7581
800	7598	7582	7624	7635	7594	7565
850	7601	7589	7616	7617	7565	7528
900	7602	7594	7600	7590	7533	7489
950	7580	7572	7574	7564	7509	7463
1000	7550	7543	7548	7538	7485	7438
1050	7523	7515	7522	7512	7460	7413
1100	7495	7488	7496	7486	7436	7388

Таблица 1.11

Коэффициент температуропроводности углеродистых сталей ($\alpha \cdot 10^6$, м²/с) [1]

Интервал температур, °С	Углеродистые стали					
	08кп	08	20	40	У8	У12
50–100	16,39	15,28	13,61	13,33	12,78	11,94
100–150	14,72	14,44	12,78	12,78	11,67	11,11
150–200	13,89	13,33	12,22	12,22	11,11	10,56
200–250	13,06	12,50	11,39	11,39	10,28	10,00
250–300	12,22	11,67	10,56	10,83	9,72	9,44
300–350	11,11	11,11	10,00	10,28	8,89	8,89
350–400	10,28	10,00	9,17	9,44	8,33	8,06
400–450	9,44	9,17	8,61	8,61	7,78	7,78
450–500	8,33	8,06	7,78	7,78	6,94	7,22
500–550	7,50	7,22	7,22	6,94	6,39	6,67
550–600	6,67	6,39	6,39	6,39	6,11	6,11
600–650	6,11	5,83	5,83	5,83	5,83	5,56
650–700	5,28	5,00	5,00	5,28	5,28	4,72
700–750	3,89	3,61	2,78	2,50	1,94	1,67
750–800	4,72	3,89	3,89	5,56	5,56	5,28
800–850	4,72	4,17	4,72	5,00	5,28	5,28
850–900	4,17	4,44	5,28	5,28	5,28	5,28
900–950	5,28	5,28	5,28	5,28	5,59	5,28
950–1000	5,28	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56
1000–1050	5,56	5,56	5,83	5,56	5,56	5,56
1050–1100	5,56	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83

Таблица 1.12

Коэффициент теплопроводности накипи (λ)

Накипь	λ , Вт/(м·°С)
Силитная накипь 20–25 % SiO ₂	0,058 – 0,233
Гипсовая накипь до 50% CaSiO ₄	0,58 – 2,9
Карбонатная накипь CaCO ₃ +MgCO ₃	0,58 – 0,7

Таблица 1.13

Интегральная степень черноты различных материалов [1]

Материал и характер поверхности	Температура * ² , °С	ϵ * ¹
<i>Чистые и окисленные металлы</i>		
Алюминий:		
полированный	225–575	0,039–0,057
шероховатый	26	0,055
окисленный при 600 °С	200–600	0,11–0,19

Продолжение табл. 1.13

Материал и характер поверхности	Температура * ² , °С	ε * ¹
Покрытая алюминием поверхность:		
меди при нагреве до 600 °С	200–600	0,18–0,19
стали при нагреве до 600 °С	200–600	0,52–0,57
Вольфрам	230–2230	0,053–0,31
Вольфрамовая нить	3300	0,39
Вольфрамовая нить, бывшая в употреблении	25–3300	0,032–0,35
Железо:		
электролитное, тщательно полированное	175–225	0,052–0,064
сварочное, тщательно полированное	40–250	0,28
полированное	425–1020	0,144–0,377
свежеобработанное наждаком	20	0,242
окисленное гладкое	125–525	0,78–0,82
литое необработанное	925–1115	0,87–0,95
Стальное литье полированное	770–1040	0,52–0,56
Сталь:		
листовая шлифованная	940–1110	0,52–0,61
окисленная при 600 °С	200–600	0,79–0,69
листовая с плотным блестящим слоем окиси	25	0,82
окисленная шероховатая	40–370	0,94–0,97
мягкая расплавленная	1600–1800	0,28
расплавленная	1075–1275	0,11–0,13
Молибденовая нить	725–2600	0,096–0,292
Никель:		
нанесенный гальваническим способом на полированное железо и затем полированный	23	0,045
технически чистый полированный	225–375	0,07–0,087
окисленный при нагреве до 600 °С	200–600	0,11
Никелевая проволока	185–1000	0,096–0,186
Хромоникель	52–1035	0,64–0,76
Олово, блестящее луженое листовое железо	25	0,043–0,064
Платина чистая полированная	225–625	0,054–0,104
Платиновая лента	925–1115	0,12–0,17
Платиновая нить	25–1230	0,036–0,192
Платиновая проволока	225–1375	0,073–0,182
Ртуть очень чистая	0–100	0,09–0,12
Свинец:		
чистый неокисленный	125–225	0,057–0,075
серный окисленный	24	0,281
окисленный при 200 °С	200	0,63

Продолжение табл. 1.13

Материал и характер поверхности	Температура [*] 2, °С	ε [*] 1
Серебро:		
полированное чистое	225–625	0,0198–0,0324
полированное	38–370	0,0221–0,0312
Хром	38–538	0,08–0,26
Цинк:		
торговый (99,1%) полированный	225–325	0,045–0,053
окисленный при нагреве до 400 °С	400	0,11
Оцинкованное листовое железо:		
очень блестящее	28	0,228
серое окисленное	24	0,276
<i>Огнеупорные, строительные, теплоизоляционные и другие материалы</i>		
Асбестовый картон	24	0,96
Асбестовая бумага	40–370	0,93–0,95
Асбошифер	20	0,96
Динасовый кирпич:		
неглазурованный шероховатый	1000	0,8
глазурованный шероховатый	1100	0,85
Кирпич:		
шамотный глазурованный	1100	0,75
магнезитовый (80% MgO, 9% Al ₂ O ₃)	1500	0,39
силикатный (95% SiO ₂)	1230	0,66
силлиманитовый (33% SiO ₂ , 64% Al ₂ O ₃)	1500	0,29
красный шероховатый	20	0,93
шамот (55% SiO ₂ , 41% Al ₂ O ₃)	1230	0,59
Фарфор глазурованный	22	0,92
Гипс	20	0,8–0,9
Штукатурка шероховатая известковая	10–90	0,91
Мрамор сероватый полированный	22	0,93
Кварц плавленный шероховатый	20	0,93
Стекло гладкое	22	0,94
Бумага	20	0,8–0,9
Вода	0–100	0,95–0,96
Дерево строганное	20	0,8–0,9
Ламповая сажа, слой 0,075 мм	40–370	0,95
Обмазка из жидкого стекла с ламповой сажой	100–225	0,96–0,95
Резина:		
твердая лощеная	23	0,95
мягкая серая шероховатая	24	0,86

Продолжение табл. 1.13

Материал и характер поверхности	Температура ^{*2} , °C	ε ^{*1}
Толь кровельный	20	0,93
Уголь очищенный (0,9 % золы)	125–625	0,81–0,79
Угольная нить	1040–1405	0,53
Эмаль белая, припаянная к железу	19	0,9
Лак:		
белый эмалевый на железной шероховатой пластине	23	0,91
черный блестящий, распыленный по железу	25	0,88
черный матовый	40–95	0,96–0,98
белый	40–95	0,80–0,95
Шеллак:		
черный блестящий на луженом железе	21	0,82
черный матовый	75–145	0,91
Масляные краски различных цветов	100	0,96–0,86
Алюминиевые краски:		
разной давности с переменным содержанием Al	100	0,27–0,67
после нагрева до 325 °C	150–315	0,35
Алюминиевый лак на шероховатой пластине	20	0,39

*¹ Степени черноты, приведенные в таблице, получены путем измерения яркости излучения в направлении нормали к поверхности тела.

*² Две температуры и две степени черноты, указанные для некоторых материалов, означают, что первая степень черноты относится к первой температуре, а вторая – ко второй, причем допускается линейная интерполяция.

Таблица 1.14

Физические свойства твердых веществ (элементов) при 0 °C [1]

Химический элемент	Атомная масса	ρ , г/см ³	$\alpha_T \cdot 10^6$, 1/°C	$t_{пл}$, °C	$Q_{пл}$, кДж/кг	c_p , кДж/(кг·°C)	λ , Вт/(м·°C)	$a \cdot 10^6$, м ² /с
Алюминий (Al)	26,9815	2,70	22,9	660,1	385,18	0,896	209,3	0,89
Барий (Ba)	137,34	3,76	–	704	–	0,285	–	–
Бериллий (Be)	9,0122	1,84	10,5	1280	1088,57	1,675	157,0	50,97
Бор (B)	10,811	2,34	8	2300	1109,50	1,285	–	–
Ванадий (V)	50,942	5,9	–	1720	334,94	0,494	34,9	11,94
Висмут (Bi)	208,98	9,83	13,3	271	54,43	0,121	9,4	7,89
Вольфрам (W)	183,85	19,34	4,3	3380	255,39	0,134	168,6	65
Галлий (Ga)	69,72	5,97	18,1	29,8	79,55	0,343	32,6	15,89
Железо (Fe)	55,847	7,88	11,3	1535	267,96	0,439	74,4	21,47
Золото (Au)	196,967	19,31	14,15	1063	66,15	0,129	312,8	124,17
Йод (I)	126,9044	4,93	93	1135	65,98	0,218	0,418	–
Иридий (Ir)	192,2	22,5	6,5	2443	117,23	0,126	60,0	20,78
Кадмий (Cd)	112,40	8,66	29,0	320,9	52,34	0,230	93,1	46,67
Калий (K)	39,102	0,87	84	63,5	61,13	0,737	100,0	155,56
Кальций (Ca)	40,08	1,54	25	851	328,66	0,657	–	–
Кобальт (Co)	58,9332	8,8	12,0	1492	272,14	0,448	69,8	17,67
Кремний (Si)	28,086	2,33	2,4	1410	–	0,712 ^{*1}	83,7	–
Литий (Li)	6,939	0,534	60	186	665,70	3,308	68,6	40,28
Магний (Mg)	24,312	1,76	25,1	650	209,34	0,976	158,2	84,72
Марганец (Mn)	54,9381	7,40	24	1250	263,77	0,431	157,0	49,17

Продолжение табл. 1.14

Химический элемент	Атомная масса	ρ , г/см ³	$\alpha_t \cdot 10^6$, 1/°C	$t_{пл}$, °C	$Q_{пл}$, кДж/кг	c_p , кДж/(кг·°C)	λ , Вт/(м·°C)	$a \cdot 10^6$, м ² /с
Медь (Cu)	63,54	8,93	16,7	1083	213,53	0,385	389,6	112,5
Молибден (Mo)	93,94	10,2	5,1	2600	200,97	0,251	140,7	54,44
Мышьяк (As)	74,9216	5,72	5,0	830	–	0,343	–	–
Натрий (Na)	22,9898	0,975	72	97,6	115,14	1,197	109,3	94,44
Неодим (Nd)	144,24	7,0	–	840	–	0,188 ^{*2}	–	–
Никель (Ni)	58,71	8,9	13,4	1453	301,45	0,427	67,5	17,78
Ниобий (Nb)	92,906	8,5	7,06	1950	–	0,268	47,7	20,97
Олово (Sn)	118,69	7,3	21	231,9	58,62	0,222	66,3	41,11
Осмий (Os)	190,2	22,48	6,1	2500	–	0,129	–	–
Палладий (Pd)	106,4	12,0	11,8	1555	150,72	0,239	70,9	24,44
Платина (Pt)	195,09	21,46	8,95	1769	104,67	0,129	69,8	24,58
Рений (Re)	186,20	20,5	12,45	3150	–	0,133	–	–
Родий (Rh)	102,905	12,44	7,85	1960	217,71	0,243	89,6	29,44
Рубидий (Rb)	85,47	1,54	90	39	25,54	0,335	46,5	90
Свинец (Pb)	207,19	11,35	28,3	327,3	23,03	0,126	35,1	24,31
Селен (Se)	78,96	4,4	37	220	66,66	0,352 ^{*1}	0,291	–
Сера (S)								
ромбическая	32,064	2,06	74	112,8	39,36	0,733	0,209	–
монокристаллитная	32,064	1,96	80	119,0	46,05	–	–	–
Серебро (Ag)	107,870	10,50	19,49	960,5	104,67	0,234	418,7	170
Сурьма (Sb)	121,75	6,69	9,2	630,5	163,29	0,205	18,8	13,75
Таллий (Tl)	204,37	11,85	28	302,5	20,93	0,134 ^{*3}	37,2	–
Тантал (Ta)	180,948	16,6	6,5	3000	154,91	0,138	54,7	–
Теллур (Te)	127,60	6,24	16	452	29,31	0,201 ^{*3}	25,1	–
Титан (Ti)	47,90	4,54	7,7	1800	376,81	0,532	15,1	6,22
Торий (Th)	232,038	11,7	11	1827	–	0,117	–	–
Углерод (C)								
алмаз	12,01115	13,51	0,91	3540	–	–	629	–
графит	12,01	1,7–2,3	7,9	3540	–	0,669	174,5	122,22
Уран (U)	238,03	19,1	23	1133	–	0,117	19,2	8,58
Фосфор (P)	30,975	1,82	125	44,1	21,77	–	–	–
Хром (Cr)	51,996	7,15	5,9	1830	316,10	0,448	69,8	21,81
Цезий (Cs)	132,905	1,87	97	28	15,91	0,201	20,9	–
Церий (Ce)	140,12	6,8	–	815	–	0,209 ^{*1}	–	–
Цинк (Zn)	65,37	7,15	30	419,5	104,67	0,381	112,8	41,11
Цирконий (Zr)	91,22	6,53	6,3	1900	251,21	0,276	–	–

Примечание: ^{*1} при 20°C; ^{*2} при 18°C; ^{*3} при 50°C; ^{*4} при 200°C

Таблица 1.15

Коэффициент теплопроводности металлов (λ , Вт/(м·°C)) [1]

t , °C	λ	t , °C	λ	t , °C	λ	t , °C	λ
Алюминий (99,8%)		Кадмий (чистый)		Натрий		Серебро (99,9%)	
		-190	104,6			-100	419,8
-190	255,9	-100	96,5			0	410,5
-100	234,9	0	93,4	-10	116,3	100	391,9
9	229,1	50	92,6	0	109,3	200	372,2
100	226,8	100	91,9	70	109,3	300	361,7
200	227,9	200	90,9			400	361,7
		300	90,1			500	366,3
						600	374,5

Продолжение табл. 1.15

t, °C	λ	t, °C	λ	t, °C	λ	t, °C	λ
Алюминий (99,0%)		Калий (99,9%)		Никель (99,94%)		Свинец (99,99%)	
-100	204,7	0	100,0	-180	110,5	-250	48,8
0	209,3	30	94,5	-50	98,9	-200	40,7
100	212,8	60	91,9	0	93,0	-100	36,6
200	219,8	Кобальт (97%)		100	82,6	0	25,1
300	225,6	0	69,8	200	73,3	50	34,3
400	230,3	100	94,2	300	63,9	100	33,5
500	234,9	200	118,6	400	59,3	150	32,8
				500	58,2	200	31,9
						300	30,2
Бериллий (99,5%)		Литий		Никель (99,2%)		Сурьма (99,99%)	
-200	90,7	-150	83,7	-50	69,8	-100	22,7
-100	124,4	-100	77,9	0	67,5	0	18,8
0	157,0	-50	72,1	100	61,6	100	16,7
50	172,4	0	68,0	200	58,2	200	15,9
100	187,7	50	67,5	400	52,3	300	16,6
200	217,9	100	70,9	600	56,9	400	18,0
250	233,1	150	73,3	800	65,1	500	20,2
						600	23,3
Висмут (99,995%)		Магний (чистый)		Никель (99,97%)		Цинк (99,993%)	
-100	11,9			-50	63,9	-200	117,5
-50	10,6	0	172,1	0	61,6	-100	115,1
0	9,4	100	166,3	100	56,9	0	112,8
50	8,4	200	162,8	200	54,7	100	108,7
100	7,7			400	48,8	200	104,7
200	7,1			600	52,3	300	100,0
				800	58,2	400	95,4
Вольфрам		Магний (99,6%)		Олово		Уран	
0	162,8						
100	151,2						
200	140,7	0	145,4	-150	79,1		
400	465,2	100	139,6	0	66,1	0	19,2
600	113,9	200	134,9	50	63,2	100	20,4
800	105,8	300	130,3	100	60,8	200	23,3
1000	98,9	400	129,1	150	59,2	300	24,2
1200	98,9	500	130,3	200	57,9	450	25,8
1500	108,2			230	57,3		
2000	132,6						
2400	147,7						
Железо (99,999%)		Магний (99,8%)		Палладий		Цирконий (100%)	
		0	158,2			100	20,1
100	87,2	100	152,4			200	20,4
200	76,8	200	147,7	-190	76,8	300	19,9
300	66,3	300	144,2	0	68,6	400	19,9
400	55,8	400	143,0	100	73,3	500	20,4
500	50,0					600	21,5
						700	22,9
Железо (99,9%)		Марганец (99,6%)		Платина (99,99%)		Цирконий (97%)	
				-100	67,8		
0	74,4	0	157,0	0	69,8	100	11,9
100	68,4	100	145,4	100	71,8	200	13,3
200	61,6	200	133,7	200	73,7	300	14,5
400	48,9	300	133,7	400	77,7	400	15,6
600	38,4	400	137,2	600	81,6	500	16,7
800	30,8	500	139,6	800	85,6	600	18,0
				100	89,6		
				1100	101,2		

Продолжение табл. 1.15

t, °C	λ	t, °C	λ	t, °C	λ	t, °C	λ
Золото (99,999%)		Медь (99,9%)		Родий		Таллий (99,9%)	
		-180	488,5				
		0	393,1				
-100	319,8	100	384,9				
0	312,8	200	377,9	-50	93,0		
50	311,7	300	370,9	0	89,1		
100	310,5	400	365,2	50	84,9	-190	62,8
200	308,2	500	359,4	100	80,2	0	51,2
300	307,0	600	353,6	150	75,0		
400	309,4	700	347,7				
500	312,8	800	340,8				
		900	332,6				
		1000	319,8				
Золото (99,98%)		Молибден (99,84%)		Серебро (99,98%)		Тантал	
0	294,2	-100	141,9				
100	294,2	0	140,7				
Иридий		100	137,2				
		200	134,9	-200	425,7	0	54,7
		400	123,1	-100	422,2	100	54,1
0	59,3	600	122,1	0	418,7	100	63,9
100	56,9	800	113,9	100	416,4	1400	72,1
200	55,8	1000	104,7	150	415,2	1800	82,6
300	55,2	1200	93,0				
		1400	80,2				
		1600	68,6				

Таблица 1.16

Коэффициент температуропроводности металлов (а, м²/с) [1]

t, °C	a·10 ⁶	t, °C	a·10 ⁶	t, °C	a·10 ⁶	t, °C	a·10 ⁶	t, °C	a·10 ⁶
Алюминий (99,0%)		100	33,50	Кобальт (97%)		Никель		Серебро (99,9%)	
0	86,94	1200	31,86	0	17,67	-50	19,28	-100	185,00
100	85,00	Иридий		100	23,54	0	17,78	0	169,44
200	84,44	0	20,78	200	27,51	100	14,61	100	158,33
300	83,89	100	19,31	Марганец (99,6%)		200	12,67	200	151,11
400	82,78	200	18,47	0	49,47	400	11,53	300	142,22
500	82,22	300	17,93	100	43,33	600	12,44	400	140,83
Бериллий (99,5%)		Кадмий		200	37,78	800	14,06	500	140,83
0	50,94	-100	49,36	300	36,11	Платина (99,99%)		600	140,83
100	49,97	0	46,67	400	35,28	0	24,72	700	140,83
200	52,75	50	45,97	500	34,17	100	25,17	Сурьма (99,99%)	
Висмут		100	45,25	Медь (99,9%)		200	25,17	-100	17,58
0	7,89	200	44,06	0	112,50	300	25,19	0	13,67
50	6,78	300	42,97	100	110,00	400	25,36	100	11,86
100	6,11	Калий		200	106,11	500	25,61	200	11,00
Вольфрам		1	155,56	300	102,78	600	26,25	300	11,14
0	62,78	10	152,78	400	100,00	700	26,44	400	11,83
200	52,75	20	150,00	500	96,67	800	26,75	500	12,94
400	46,72	30	147,22	600	94,17	900	26,81	600	14,67
600	40,58	40	145,00	800	88,33	1000	27,03		
800	36,75	50	143,33	1000	81,11	1100	27,22		
		60	141,67						

t, °C	a·10 ⁶	t, °C	a·10 ⁶	t, °C	a·10 ⁶	t, °C	a·10 ⁶
Железо (99,9%)		Магний (99,6%)		Натрий		Свинец (99,99%)	
1	21,47	0	84,72	-10	96,67	-250	40,28
100	17,83	100	74,72	0	94,44	-200	31,25
200	15,31	200	70,00	10	93,89	-100	25,58
400	10,31	300	66,39	20	93,06	0	24,28
600	6,75	400	65,83	40	92,78	100	22,36
800	4,39	500	67,22	60	91,67	200	22,39
Золото (99,999%)		Магний (чистый)		Олово		300	
-100	131,67	100	89,25	0	41,11	Цинк (99,993%)	
0	124,17	200	84,00	50	37,17	-200	46,39
100	123,19	Молибден (99,84%)		100	34,72	-100	43,61
200	121,81	-100	56,39	150	32,58	0	41,11
300	120,22	0	54,72	200	31,14	100	38,33
400	119,75	100	51,94	230	30,47	200	35,56
500	119,94	200	50,56	Родий		300	33,06
Литий		400	45,83	0	29,44	400	30,56
0	40,28	600	41,94	50	27,50		
50	38,33	800	38,06	100	25,56		
100	34,17	1000	34,72	150	22,50		
		1200	28,89				
		1400	23,89				
		1600	20,00				

Таблица 1.17

Механические свойства важнейших металлов [1]

Наименование металла и обозначение модификации	σ_B , МН/м ²	$\sigma_{пц}$, МН/м ²	σ_T , МН/м ²	δ , %	ψ , %	E, МН/м ²	НВ, Н/м ²
Алюминий (Al)	80–110	30	30–70	40	85	72000	20–35
Бериллий (α -Be)	140	60	–	–	–	300000	140
Вольфрам (β -W)	1200–1400	–	750	–	–	420000	350
Железо (α -Fe)	250–330	120	125	25–55	70–85	210000	50
Кадмий (α -Cd)	62	3	10	20	50	530000	20
Кобальт (α -Co)	240	–	–	5	–	207500	125
Кремний (Si)	–	–	–	–	–	114500	240
Магний (Mg)	170–200	12	20–60	15	20	43600	25
Марганец:							
α -Mn	хруп-	хруп-	хруп-	хруп-	хруп-	201600	210
β -Mn	кий	кий	кий	кий	кий	201600	210
Медь (Cu)	220	15	60–80	60	75	132000	35
Молибден (Mo)	700	–	–	30	–	330000	125
Никель (α -Ni)	400–500	80	120	40	70	205000	60–80
Ниобий (Nb)	340	–	–	–	30	–	250
Олово (белое)(β -Sn)	20–40	1,5	–	40	75	55000	5
Свинец (Pb)	18	2,5	5–10	50	100	17000	4–6
Титан (α -Ti)	600	–	440	28	–	105000	230
Хром (α -Cr)	хрупкий	хрупкий	хрупкий	хрупкий	хрупкий	252000	220
Цирконий (α -Zr)	950	950	–	–	–	70000	82
Цинк (Zn)	110–150	–	90–100	5–20	–	94000	30–42

Таблица 1.18

Теплофизические свойства графита [1]

Характеристики	Направление потока	Температура, °С				
		20	200	400	600	800
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м ⁰ С) графита:						
кристаллический		354,7	308,2	–	–	–
естественный	⊥	195,4	144,2	112,8	91,9	75,6
прессованный		157	118,6	93,0	69,8	63,9
искусственный с $\rho=1,76$ г/см ³	⊥	104,7	81,4	69,8	58,2	–
то же, с $\rho=1,55$ г/см ³		130,3	102,3	79,1	63,9	53,5
Сопротивление разрыву $\sigma_{\text{пц}}$, МН/м ²		14,2	15,2	15,9	16,5	17,6
	⊥	10,3	11,3	12,0	12,5	13,7
Модуль упругости E , МН/м ²		5880	7100	7350	7500	7840
	⊥	2700	3040	3200	3630	3920
Удельная теплоемкость c , кДж/(кг·°С)	–	0,71	1,17	1,47	1,68	1,88
Электросопротивление $\rho_3 \cdot 10^4$, Ом·см	–	16	13	11	10	9
Коэффициент линейного расширения $\alpha_T \cdot 10^6$, 1/°С		7,2* ¹	8,5* ²	10,0* ³	13,0* ⁴	–
	⊥	4,0* ¹	5,5* ²	6,8* ³	9,3* ⁴	–
		1,8* ¹	1,55* ²	1,45* ³	1,40* ⁴	–

Примечание. Величины $\sigma_{\text{пц}}$, c , E , ρ , α_T приведены для графита с объемной массой $\rho=1,7 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.
*¹ При 0 – 500°С. *² При 0 – 1000°С. *³ При 0 – 1500°С. *⁴ При 0 – 2000°С.

Таблица 1.19

**Предел прочности некоторых марок стали и сплавов
при повышенных температурах (испытания при прямом нагреве) [1]**

Марка стали или сплава	Предел прочности σ_B , МН/м ² , при температуре, °С						
	700	800	900	1000	1100	1200	1300
15	54,9	56,9	44,1	27,4	23,5	13,7	–
У7	84,3	59,8	37,3	30,4	18,6	10,8	–
У12	70,6	67,7	27,5	23,5	14,7	12,7	–
12ХН3А	127,5	79,4	51,0	39,2	27,5	15,7	12,7
18ХНВА	224,6	110,8	64,7	48,1	26,5	18,6	14,7
30ХГСА	95,1	72,6	41,2	35,3	21,6	17,6	–
60СА	163,4	79,4	55,9	33,3	25,5	32,4	5,9
X12M	140,2	122,6	81,4	46,1	24,5	7,8	–
P9	192,2	90,2	81,4	55,9	32,4	20,6	–
P18	221,6	11,8	107,9	66,7	31,4	20,6	–
1X13	64,7	35,3	26,5	36,3	21,6	11,8	–
X9C2	137,3	51,0	58,8	45,1	22,6	15,7	–
X17	84,3	40,2	21,6	20,6	13,7	7,8	5,9
X28	75,5	25,5	18,6	10,8	7,8	7,8	–
1X25105	173,6	80,4	47,1	19,6	9,8	5,9	–
1X18H9	221,8	119,6	67,7	38,2	30,4	15,7	–
1X18H9T	–	181,4	89,2	53,9	37,3	17,6	–
X18H11B	–	148,1	–	53,0	–	19,6	9,8
X18H25C2	331,5	78,5	100,0	61,8	30,4	21,6	–
X23H18	266,7	138,4	90,2	53,9	51,0	28,4	13,7
X13H4Г9	220,6	143,2	69,6	43,1	22,6	13,7	–
X14H14B2M	–	–	143,2	70,6	43,1	26,5	–
X15H60	286,4	166,7	104,0	58,8	38,2	26,5	–
X20H80	436,4	213,8	92,2	71,6	35,3	22,6	–

Таблица 1.20

Истинные (c , кДж/(кг·°C)) и средние удельные (c_m , кДж/(кг·°C)) теплоемкости окислов – основных компонентов огнеупорных материалов и шлаков [1]

t, °C	SiO ₂		Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃		FeO		MgO		MnO		CaO	
	c	c _m	c	c _m	c	c _m	c	c _m	c	c _m	c	c _m	c	c _m
0	0,669	0,669	0,720	0,720	0,615	0,615	0,699	0,699	0,817	0,871	0,762	0,762	0,737	0,737
100	0,795	0,783	0,925	0,837	0,724	0,674	0,737	0,720	1,017	0,955	0,825	0,787	0,821	0,783
200	0,963	0,849	1,026	0,909	0,799	0,720	0,758	0,733	1,089	1,005	0,879	0,812	0,858	0,812
300	1,026	0,900	1,089	0,959	0,854	0,754	0,766	0,745	1,135	1,043	0,929	0,833	0,883	0,833
400	1,068	0,938	1,130	0,996	0,904	0,787	0,783	0,754	1,164	1,068	0,976	0,858	0,896	0,846
500	1,105	0,967	1,164	1,026	0,955	0,816	0,795	0,758	1,189	1,089	1,013	0,879	0,909	0,858
600	1,135	0,992	1,193	1,051	1,000	0,842	0,808	0,766	1,206	1,109	1,047	0,900	0,921	0,867
700	1,159	1,013	1,218	1,076	1,047	0,867	0,816	0,775	1,227	1,122	1,076	0,917	0,929	0,875
800	1,189	1,034	1,239	1,093	1,093	0,892	0,825	0,779	1,243	1,139	1,097	0,934	0,938	0,883
900	1,209	1,051	1,260	1,109	–	–	0,837	0,783	1,256	1,151	1,114	0,946	0,946	0,892
1000	1,235	1,072	1,281	1,126	–	–	–	–	1,273	1,159	1,126	0,959	0,950	0,896
1100	1,256	1,084	1,302	1,143	–	–	–	–	1,285	1,172	–	–	0,959	0,900
1200	1,281	1,101	1,323	1,156	–	–	–	–	1,302	1,181	–	–	0,963	0,909
1300	1,302	1,114	1,339	1,168	–	–	–	–	1,315	1,193	–	–	0,971	0,913
1400	1,323	1,130	1,361	1,181	–	–	–	–	1,327	1,202	–	–	0,979	0,917
1500	1,344	1,143	1,378	1,193	–	–	–	–	1,339	1,209	–	–	0,984	0,921

Таблица 1.21

Химико–минералогический состав огнеупорных изделий [1]

Огнеупоры	Определяющий химический компонент (на прокаленное вещество)	
	обозначение	содержание, %
Кремнеземистые:		
кварцевое стекло	SiO ₂	>99
динасовые (тридимитокристаллитовые) на известковой связке	SiO ₂	>93
то же, на различных связках и с разными добавками	SiO ₂	>80
Алюмосиликатные (низко-, средне- и высокоглиноземистые):		
полукислые	Al ₂ O ₃	>28
шамотные	SiO ₂	65 – 85
муллитокремнеземистые	Al ₂ O ₃	28 – 45
муллитовые	Al ₂ O ₃	45 – 62
муллитокорундовые	Al ₂ O ₃	62 – 72
корундовые	Al ₂ O ₃	72 – 90
Магнезиальные:		
магнезитовые (периклазовые)	MgO	>90
то же, на различных связках	MgO	>80
Магнезиально–известковые:		
магнезитодоломитовые (периклазоизвестковые)	MgO	>50
	CaO	>10
доломитовые (известковопериклазовые)	MgO	35 – 50
	CaO	45 – 70
то же, стабилизированные (периклазоалитовые)	MgO	35 – 65
	SiO ₂	6 – 15
	CaO	15 – 40
известковые	CaO : SiO ₂	2,7 – 2,9
	CaO	>70

Продолжение табл. 1.21

Огнеупоры	Определяющий химический компонент (на прокаленное вещество)	
	Обозначение	Содержание, %
Магнезиально–шпинелидные:		
магнезитохромитовые (периклазохромитовые)	MgO	>60
	Cr ₂ O ₂	5 – 18
хромомagneзитовые (хромитопериклазовые)	MgO	40 – 60
	Cr ₂ O ₃	15 – 30
хромитовые	MgO	<40
	Cr ₂ O ₃	>25
периклазошпинельные	MgO	40 – 80
	Al ₂ O ₃	15 – 55
шпинельные	MgO	25 – 40
	Al ₂ O ₃	55 – 70
Магнезиально–силикатные:		
периклазофорстеритовые	MgO	65 – 80
	SiO ₂	>10
форстеритовые	MgO	50 – 65
	SiO ₂	25 – 35
форстеритохромитовые	MgO	45 – 60
	SiO ₂	20 – 30
	Cr ₂ O ₃	5 – 15
Углеродистые:		
углеродистые графитированные	C	>98
углеродистые неграфитированные	C	>85
углеродсодержащие	C	5 – 70
Карбидкремниевые:		
карбидкремниевые рекристаллизованные	SiC	>90
карбидкремниевые на различных связках	SiC	>70
карбидкремнийсодержащие	SiC	20 – 70
Цирконистые:		
циркониевые (бадделеитовые)	ZrO ₂	>90
бадделеитокорундовые	ZrO ₂	>30
	Al ₂ O ₃	<65
цирконовые на различных связках с разными добавками	ZrO ₂	>35
	SiO ₂	>18
Окисные:		
изделия из окислов (BeO, MgO, CaO, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , TiO ₂ , UO ₂ и др.)	–	Максимально высокое содержание определяющего окисла
Некислородные:		
изделия из нитридов, боридов, карбидов (кроме SiC), силицидов и других некислородных соединений	–	Максимально высокое содержание некислородных соединений

Таблица 1.22
Средний коэффициент линейного расширения металлов ($\alpha_t, 1/^\circ\text{C}$)
в интервале температур от 0 до $t^\circ\text{C}$ [1]

$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha_t \cdot 10^6$	$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha_t \cdot 10^6$	$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha_t \cdot 10^6$	$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha_t \cdot 10^6$	$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha_t \cdot 10^6$	$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha_t \cdot 10^6$
Алюминий		Железо		Кобальт		Молибден		Родий		Сурьма	
-100	19,5	0	11,30	0	12,0	0	5,10	0	7,85	0	9,2
0	22,8	100	12,15	100	12,5	100	5,19	200	8,71	100	9,4
100	23,7	200	12,70	200	13,0	200	5,28	400	9,46	200	9,6
200	24,5	400	13,80	300	13,5	300	5,39	600	10,14	300	9,8
300	25,4	600	14,50	400	13,9	400	5,48	800	10,71	400	10,0
400	26,2	800	14,80	500	14,4	500	5,59	1000	11,21	500	10,2
500	27,1	Золото		Магний		600	5,68	1200	11,62	600	10,3
600	27,9	0	14,15	-100	24,12	800	5,87	1400	11,94	Титан	
Бериллий		100	14,32	0	25,07	Никель		1500	12,07	0	7,7
0	10,5	200	14,51	100	26,00	0	13,40	Свинец		100	8,1
100	11,7	400	14,96	200	27,00	100	13,60	-250	25,1	200	8,5
200	12,8	600	15,49	400	29,83	200	14,00	-200	26,5	400	9,2
300	13,7	800	16,12	600	31,71	250	14,27	-100	27,3	600	10,0
400	14,5	1000	16,80	Марганец		300	14,60	0	28,3	700	10,4
500	15,2	Иридий		0	22,0	350	14,97	100	29,2	Хром	
600	15,7	0	6,50	200	22,2	400	14,98	200	30,3	-100	5,10
Висмут		100	6,65	400	23,0	600	15,56	300	31,3	0	5,88
0	15,4	200	6,80	600	24,0	800	16,13	Серебро		100	6,61
Вольфрам		400	7,11	800	26,0	Олово		-100	18,50	200	7,28
0	4,30	600	7,41	Медь		0	21,0	0	19,50	400	8,40
200	4,44	800	7,72	0	16,70	50	23,5	100	19,62	600	9,22
400	4,60	Кадмий		100	17,06	100	26,2	200	19,79	700	9,40
600	4,72	-50	28,3	200	17,42	150	28,9	300	20,00	Цинк	
800	4,86	0	29,0	400	18,14	200	31,6	400	20,30	-200	22
1000	5,01	50	29,7	600	18,86	Платина		500	20,60	-100	28
1200	5,15	100	30,4	800	19,58	0	8,95	600	21,00	0	30
1500	5,35	150	31,1	1000	20,30	100	9,10	700	21,40	100	32
1700	5,51	200	31,8			200	9,20	800	21,80	200	34
1900	5,60	250	32,4			400	9,45	900	22,40	300	36
2100	5,80					600	9,65			400	38
Галлий						800	9,90				
0	18,1					1000	10,15				
						1100	10,35				

Таблица 1.23
Химический состав некоторых углеродистых сталей [1]

Марка	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	As	Режим тер- мической обработки: обжиг при $t, ^\circ\text{C}$
08кп	0,60	0,01	0,380	0,035	0,017	0,022	0,055	0,03	0,080	0,001	0,039	930
08	0,80	0,08	0,310	0,050	0,029	0,045	0,070	0,02	следы	0,002	0,032	930
20	0,23	0,11	0,635	0,034	0,034	следы	0,074	–	0,130	0,010	0,036	930
04	0,415	0,11	0,643	0,029	0,031	следы	0,063	–	0,120	0,006	0,033	860
У8	0,80	0,13	0,320	0,009	0,008	0,110	0,130	0,01	0,070	0,004	0,021	800
У8'	0,84	0,13	0,240	0,014	0,014	следы	следы	–	0,020	0,004	0,008	–
У12	1,22	0,16	0,350	0,015	0,009	0,110	0,130	0,01	0,077	0,006	0,025	800

Таблица 1.24

Средняя удельная теплоемкость металлов (c_m , кДж/(кг·°C)) [1]

$t, ^\circ\text{C}$	c_m	$t, ^\circ\text{C}$	c_m	$t, ^\circ\text{C}$	c_m	$t, ^\circ\text{C}$	c_m	$t, ^\circ\text{C}$	c_m
Алюминий		Галлий		Литий		Молибден		Титан	
0	0,895	-10	0,352	-200	2,63	0	0,251	0	0,532
50	0,904	0	0,352	-100	3,06	200	0,259	100	0,540
100	0,913	29	0,356	0	3,31	400	0,264	200	0,553
150	0,925	Железо		50	3,42	600	0,268	400	0,574
200	0,938	0	0,439	100	3,56	800	0,276	600	0,595
300	0,955	100	0,461	150	3,68	1000	0,281	800	0,619
400	0,979	200	0,482	180	3,77	1200	0,285	900	0,628
500	0,996	400	0,523	Магний		1400	0,293	Цинк	
600	1,022	600	0,578	0	0,976	Олово		-200	0,343
Бериллий		800	0,645	100	1,029	0	0,222	-100	0,368
-100	1,298	900	0,666	200	1,059	50	0,226	0	0,3839
0	1,675	1000	0,682	300	1,089	100	0,230	100	0,3923
100	1,888	1200	0,678	400	1,114	150	0,234	200	0,4011
200	2,026	Золото		500	1,135	200	0,239	300	0,4095
300	2,148	0	0,1302	600	1,147	230	0,243	400	0,4183
400	2,219	100	0,1306	Марганец		Платина		Хром	
500	2,294	200	0,1315	0	0,431	0	0,1310	-200	0,276
600	2,357	400	0,1327	100	0,461	200	0,1344	-100	0,377
700	2,416	600	0,1348	200	0,486	400	0,1373	0	0,448
800	2,470	800	0,1378	400	0,540	600	0,1403	100	0,461
900	2,525	1000	0,1403	600	0,595	800	0,1428	200	0,473
Ванадий		Кадмий		800	0,624	1000	0,1453	400	0,494
0	0,494	-100	0,221	1000	0,678	1200	0,1482	600	0,519
100	0,502	-50	0,230	1200	0,724	1400	0,1507	800	0,544
200	0,511	0	0,230	Натрий		1600	0,1532	1000	0,565
400	0,528	50	0,231	-150	1,022	Свинец		1200	0,590
600	0,536	100	0,2336	-100	1,076	-180	0,1218	1400	0,615
800	0,549	150	0,2353	-50	1,143	-100	0,1231	1500	0,628
1000	0,565	200	0,2369	0	1,197	0	0,1273		
1200	0,586	250	0,2386	20	1,206	100	0,1320		
1400	0,641	Калий		50	1,223	200	0,1336		
Висмут		-100	0,669	70	1,261	300	0,1369		
0	0,1235	-50	0,729	90	1,244	Серебро			
50	0,1248	-20	0,733	Никель		-200	0,2114		
100	0,1260	0	0,737	0	0,427	-100	0,2257		
150	0,1273	20	0,741	100	0,448	0	0,2332		
200	0,1285	50	0,745	200	0,473	100	0,2361		
250	0,1298	Кобальт		400	0,511	200	0,2391		
Вольфрам		-100	0,352	600	0,519	300	0,2424		
0	0,1339	0	0,448	800	0,523	400	0,2445		
200	0,1361	200	0,461	1000	0,528	500	0,2474		
400	0,1382	400	0,477	Медь		700	0,2525		
600	0,1403	600	0,502	0	0,389	900	0,2575		
800	0,1424	800	0,532	100	0,394				
1000	0,1444	1000	0,574	200	0,398				
1200	0,1465	1200	0,619	400	0,406				
1400	0,1486			600	0,414				
1600	0,1507			800	0,423				
1800	0,1528			1000	0,431				

Таблица 1.25

Теплофизические свойства металлов и сплавов [1]

Металлы	ρ , кг/м ³	c , кДж/ (кг·°C)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C), при температуре °C							
				-100	0	20	100	200	300	400	600
Алюминий: чистый	2700	0,896	94,44	231,9	228,4	228	228,4	228,4	228,4	–	–
сплав Al – Cu (дюралюминий 94–96% Al; 3–5% Cu; следы Mg)	2800	0,883	66,67	126,3	159,2	164,5	181,7	183,9	–	–	–
сплав Al – Mg (91–95% Al; 5–9% Mg)	2600	0,904	48,06	93,4	108,9	112,5	126,3	141,9	–	–	–
сплав Al – Si (87% Al; 13% Si)	2660	0,871	71,67	148,9	162,8	163,9	174,5	184,9	–	–	–
сплав Al – Si (86,5% Al; 12,5% Si; 1% Cu)	2660	0,867	59,72	119,4	137,2	136,8	144,2	152,4	160,9	–	–
сплав Al – Si (78–80% Al; 20–22% Si)	2630	0,854	71,39	143,6	157,5	160,9	167,5	174,8	177,9	–	–
сплав Al – Mg – Si (97% Al; 1% Mg; 1% Si; 1% Mn)	2700	0,892	73,89	–	174,8	176,8	188,6	204,7	–	–	–
Свинец	11350	0,129	23,89	36,9	35,1	34,7	33,4	31,5	29,8	–	–
Медь (чистая)	8950	0,385	112,22	407,1	386,1	386,1	379,1	373,3	–	364,0	353,6
Алюминиевая бронза (95% Cu; 5% Al)	8660	0,410	23,31	–	–	83,0	–	–	–	–	–
Бронза (75% Cu; 25% Sn)	8660	0,343	8,61	–	–	25,9	–	–	–	–	–
Красная латунь (85% Cu; 9% Sn; 6% Zn)	8710	0,385	18,03	–	58,8	60,5	70,9	–	–	–	–
Латунь (70% Cu; 30% Zn)	8520	0,385	34,17	88,3	–	110,7	129,1	143,6	147,1	147,1	–
Константан (60% Cu; 40% Ni)	8820	0,410	6,11	20,6	–	22,7	22,2	25,9	–	–	–
Нейзильбер (62% Cu; 15% Ni; 22% Zn)	8613	0,394	7,47	18,9	–	24,9	31,2	45,0	45,0	48,5	–
Магний (чистый)	1745	1,013	97,22	177,9	170,9	170,9	167,5	162,8	157,0	–	–
сплав Mg – Al 6–8% Al; 1–2% Zn	1810	1,004	36,11	–	51,9	65,7	62,3	74,4	86,5	–	–
сплав Mg – Mn (2% Mn)	1809	1,004	63,89	93,5	110,7	114,2	124,6	130,3	–	–	–
Молибден	10214	0,252	53,61	138,4	137,2	137,2	137,2	–	–	–	–

Продолжение табл. 1.25

Металлы	ρ , кг/м ³	c , кДж/ (кг·°C)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C), при температуре °C								
				-100	0	20	100	200	300	400	600	800
Никель: чистый (99,9%)	8900	0,460	22,78	107,9	93,5	90,0	83,0	72,7	64,0	58,8	–	–
нечистый (99,2%)	8900	0,460	17,47	–	69,2	69,2	64,1	58,8	55,4	51,9	55,4	62,3
сплав Ni – Cr (90% Ni; 10% Cr)	8660	0,460	4,44	–	17,1	17,3	18,8	20,9	22,8	24,5	–	–
сплав Ni – Cr (80% Ni; 20% Cr)	8310	0,460	3,33	–	12,3	12,7	13,8	15,6	17,1	18,8	22,4	–
Серебро: Высокоочищенное	10520	0,252	170,28	418,7	417,5	418,7	415,2	411,7	–	–	–	–
чистое (99,9%)	10520	0,252	165,56	418,7	410,5	407,3	392,0	373,3	360,5	360,5	–	–
Вольфрам	19300	0,126	62,78	–	166,3	162,8	150,0	141,9	133,7	126,8	112,8	76,2
Цинк (чистый)	7140	0,386	41,11	114,2	115,5	112,1	108,9	105,6	100,4	93,4	–	–
Олово (чистое)	7300	0,226	38,89	74,4	65,9	64,1	58,8	57,1	–	–	–	–
Титан	4540,6	0,532	6,31	–	15,1	–	15,7	–	16,9	18 (500)	–	–

Примечание. Плотность, теплоемкость и температуропроводность приведены при 20°C

Таблица 1.26

Коэффициент теплопроводности (λ) хромистых сталей [1]

t , °C	λ , Вт/(м·°C), при V, %, где V – суммарное объемное содержание примесей (кроме железа)													
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
100	33,5	30,9	28,8	27,7	26,4	25,6	25,1	24,7	24,7	24,3	24,1	23,8	23,5	23,3
200	32,7	30,1	28,5	27,2	26,5	25,9	25,7	25,6	25,1	24,9	24,7	24,3	24,3	23,8
300	31,4	29,3	28,0	27,2	26,6	26,2	25,9	25,9	25,6	25,6	25,6	25,4	25,1	25,1
400	30,1	28,6	27,6	27,2	26,7	26,4	26,2	25,9	25,9	25,9	28,6	28,6	28,6	28,6
500	28,8	28,0	27,4	26,9	26,7	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4
600	27,7	27,2	26,6	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7

Таблица 1.27

Коэффициент теплопроводности (λ) углеродистых сталей [1]

t , °C	λ , Вт/(м·°C), при Σ , %, где Σ – суммарное массовое содержание легирующих элементов (C, Si, Mn и др.)										
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0	73,4	70,2	64,5	59,5	55,4	51,9	48,1	47,1	45,9	45,5	45,6
50	70,5	67,8	62,8	58,5	54,7	51,5	49,0	46,9	45,4	44,7	44,3
100	67,6	65,2	60,8	57,0	53,6	50,7	48,3	46,3	44,7	43,7	43,0
200	61,5	59,9	56,6	53,7	51,0	48,6	46,4	44,4	42,8	41,2	40,0
300	55,6	54,4	52,2	50,1	47,9	46,1	44,2	42,4	41,1	39,2	37,7
400	49,2	48,5	47,0	45,7	44,0	42,6	41,2	39,8	38,3	37,0	35,6
500	42,9	42,3	41,3	40,4	39,3	38,8	37,2	36,2	35,1	34,3	33,4

Таблица 1.28

Удельное электросопротивление металлов (ρ , Ом·см) [1]

t, °C	ρ , 10 ⁶	t, °C	ρ , 10 ⁶	t, °C	ρ , 10 ⁶	t, °C	ρ , 10 ⁶
Алюминий (99,7%)		200	3,8	800	7,38	Свинец	
-100	1,46	400	5,5	1000	9,24	-250	0,5
0	2,62	600	7,7	Молибден		-200	4,0
100	3,86	800	10,0	0	5,15	-100	11,5
200	5,20	1000	12,5	200	11,0	0	19,0
300	6,50	Иридий		400	16,5	100	27,2
400	8,10	0	4,85	800	28	200	36,5
500	9,60	100	6,85	1000	33	300	48,0
600	10,9	200	8,77	1400	44	320	54,0
Бериллий (99,5%)		400	13,2	1800	55	Серебро (99,9%)	
-200	1,3	600	17,2	2200	68	-250	0,0135
-100	2,8	Кадмий (99,9%)		2400	74	-200	0,300
0	5,7	-50	5,14	2500	78	-100	0,893
100	9,5	0	6,50	Натрий		0	1,50
200	13,6	50	7,86	-200	0,75	100	2,12
400	22,5	100	9,29	-100	2,30	200	2,73
600	33,5	200	12,1	0	4,26	400	4,05
700	39,0	250	13,5	50	5,28	600	5,44
Ванадий (99%)		Калий		75	5,85	800	6,88
0	19,0	-10	5,78	Никель (99,98%)		900	7,65
50	21,8	0	6,10	0	6,5	Сурьма	
100	25,0	10	6,40	100	10,8	-200	8
200	30,0	30	7,10	200	16,2	-100	22
300	36,0	50	7,70	400	31,7	0	36
Висмут (99,9%)		Кобальт (99,95%)		600	39,2	100	51
0	111,0	0	5,50	800	44,2	Титан	
100	156,5	100	10,1	1000	49,1	0	56
200	214,5	200	14,7	Ниобий		100	80
270	267,0	300	19,5	0	14,0	200	106
Вольфрам		400	25,5	100	17,5	400	133
0	5,00	Литий		200	21,0	600	138
200	10,0	-200	0,86	Олово (99,99%)		Хром (электролитический)	
400	15,0	-100	4,74	0	11,0	0	14,5
800	26,5	0	8,65	50	13,8	200	21,9
1000	33,0	50	10,6	100	16,5	400	31,1
1400	46,0	100	12,3	150	19,2	600	42,1
1600	52,5	150	14,0	200	22,0	800	54,9
2000	66,0	Магний		Платина (99,999%)		1000	72,5
2400	80,0	0	4,20	0	11,75	1200	85,9
2800	95,2	100	5,77	100	13,64	1400	104,1
3200	110,0	200	7,57	200	17,35	1600	124,1
Галлий		400	12,05	300	21,00	1800	146,0
0	43,9–53,4	600	17,30	400	24,40	Цинк (99,993%)	
Железо (99,92%)		Марганец		500	27,80	-250	0,05
0	9,0	0	255	Родий		-200	1,30
100	15,0	200	280	0	4,30	-100	3,31
200	21,5	400	300	200	8,08	0	5,50
400	42,0	600	310	400	11,87	100	7,90
600	69,0	800	150	600	15,65	200	10,4
800	101	1000	130	800	19,44	300	13,2
1000	117	1200	70	1000	23,22	400	16,0
1200	122	Медь (99,999%)		Рубидий (чистый)			
1400	126	0	1,55	0	11,4		
Золото (99,99%)		100	2,22	10	12,0		
0	2,19	200	2,38	20	12,6		
100	3,00	400	4,26	30	13,2		
		600	5,72				

Таблица 1.29

**Коэффициент теплопроводности (λ) некоторых цветных металлов
и технических сплавов [1]**

Наименование сплава	Химический состав	λ , Вт/(м ⁰ С), при температуре, °С						
		0	100	200	300	400	500	600
Никель чистотой 99,2%	–	67,5	62,8	58,2	–	52,3	–	56,9
Нихром	10 Cr, остальное никель	17,1	18,9	20,9	22,8	24,7	–	–
	20 Cr, остальное никель	12,2	13,8	15,6	17,2	18,9	–	22,6
Монель	15Cr + 20Fe + 4Mn, остальное никель	11,6	11,9	12,2	12,4	12,7	12,9	13,1
	16Cr + 23F, остальное никель	11,8	13,3	14,6	16,5	17,4	–	–
	40Cu, остальное никель	20,1	25,6	32,8	39,7	–	–	–
Монель	29Cu + Fe, остальное никель	20,1	24,4	27,6	30,2	33,7	–	–
	12Cr + 25Fe, остальное никель	13,5	14,9	15,2	15,5	15,7	15,8	16,2
<i>Сплавы никеля по ГОСТ 492–58</i>								
Мельхиор:								
HM81	19Ni + 1Co, остальное медь	37,7	–	–	–	–	–	–
HM70	30Ni + 1Co, остальное медь	37,1	–	–	–	–	–	–
Константан НММц	40,0Ni + 1,5Mn, остальное медь	20,9	23,2	26,3	30,6	37,2	–	–
58,5–1,54								
Копель НМ 56,5	43,0Ni, остальное медь	24,2	–	–	–	–	–	–
Монель НМЖМц и К– монель	25,0Fe + 57,0Ni + 1,6Mn, остальное медь	25,1	–	–	–	–	–	–
Алюмель	2,0Al + 94,0Ni + 2,0Mn	32,7	–	–	–	–	–	–
Хромель	90,0 Ni + 9Cr + 1Co	16,0	17,8	19,8	21,6	23,5	–	–
Манганин НММц 85–12	Cu + 3,0Ni + 12,0Mn	21,7	26,4	31,4	36,1	–	–	–
Инвар	65,0Fe + 35,0Ni	11,0	11,4	11,9	12,7	–	–	–
<i>Магниевые сплавы по ГОСТ 2856–68</i>								
Электрон	92Mg + 8,0Al	61,6	70,0	79,3	88,9	–	–	–
	88Mg + 10,0Al + 2,0Si	58,2	66,4	75,9	–	–	–	–
	92Mg + 8,0Cu	125,9	130,0	133,3	139,2	–	–	–
Платиноиридий	93Mg + 0,5Cu + 4,0Zn	117,5	130,9	–	–	–	–	–
Платинородий	90Pt + 10Ir	30,9	31,4	32,4	–	–	–	–
Платинородий	90Pt + 10Rh	30,2	30,6	31,6	–	–	–	–
<i>Мягкие припои по ГОСТ 1499–70</i>								
Олово чистое	–	66,1	59,3	56,9	–	–	–	–
Свинец чистый	–	35,1	33,4	32,2	29,8	–	–	–
ПОС–90	89 – 90 Sn, не более 0,15 Sb, остальное свинец	62,6	–	–	–	–	–	–
ПОС–40	40,0Sn + 2Sb, остальное свинец	39,8	–	–	–	–	–	–
ПОС–30	30,0 Sn + 2Sb, остальное свинец	38,1	–	–	–	–	–	–
ПОС–18	18,0 Sn + 2,5 Sb, остальное свинец	38,5	–	–	–	–	–	–
Металл Розе	50 Bi + 25 Sn + 25 Pb	16,3	–	–	–	–	–	–
Металл Вуда	48 Bi + 13 Cd + 13 Sn + 26 Pb	12,8	–	–	–	–	–	–

Таблица 1.30

Коэффициент теплопроводности низколегированных сталей (λ , Вт/(м·°С)) [1]

№ марки стали	Марка стали	Температура t, °С											
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
1	15М	–	45,3	43,6	42,4	40,7	37,2	36,1	32,6	31,4	30,2	–	–
2	20М	–	44,8	43,0	41,9	40,1	37,2	36,1	32,6	31,4	29,1	–	–
3	12МХ	44,8	43,8	42,6	41,2	39,3	36,9	–	–	–	–	–	–
3a	12МХ	42,4	42,1	41,8	40,6	38,9	37,1	38,4	33,6	32,2	30,8	–	–
3б	12МХ	45,00	44,5	43,1	40,9	38,7	36,9	34,7	–	–	–	–	–
4	15ХМ	–	44,2	41,3	40,7	38,9	36,1	33,7	–	29,1	28,5	–	–
5	20ХМ	–	43,6	41,3	40,7	38,9	36,1	37,2	–	29,1	28,5	–	–
6	30ХМА	–	41,9	40,7	39,5	38,4	–	–	–	–	–	–	–
7	12ХМФ	–	44,2	41,3	40,7	38,9	36,1	33,7	–	29,1	28,5	–	–
8	15ХФ	–	45	44,3	43,5	40,7	37,7	33,7	29,8	–	–	–	–
8a	15ХФ	–	43,1	42,3	42,1	39,7	36,4	33,5	29,8	–	–	–	–
9	30Х	47,7	46,5	44,4	42,3	38,5	35,6	31,9	28,8	26,1	26,7	28,0	28,8
9a	30Х	42,7	42,7	41,9	40,7	38,9	36,5	33,9	31,1	26,4	27,2	28,0	29,3
14	10Х2Мф (ЭИ531)	–	38,4	37,8	37,8	37,2	35,5	32,6	29,1	–	27,3	–	–
15	10Х2МБ (ЭИ454)	–	37,2	36,6	36,1	36,1	34,9	32,6	29,1	–	27,3	–	–
16	25Х2МФ (ЭИ10)	–	41,9	41,4	41,1	39,5	–	–	–	–	–	–	–
17	12Х2Н (Э1)	33,0	33,0	33,4	–	–	35,5	32,6	29,8	28,1	27,3	–	–
18	25Н3	37,2	37,7	38,6	38,1	36,4	34,3	31,9	28,5	25,1	26,4	27,7	28,6
19	12ХН3 (25)	37,8	–	–	–	–	31,4	–	25,6	–	25,6	–	–
20	20ХН3 (Э6)	45,4	43	39,5	–	–	36,5	–	29,1	29,1	–	–	–
21	30ХН3	35,2	36	36,9	36,9	36,5	35,2	33,5	29,3	26,1	26,4	27,7	28,8
21a	30ХН3	33,7	35,6	36,9	36,5	36,5	34,3	31,9	28,5	26,1	26,4	27,7	28,8
21б	30ХН3	33,5	33,9	35,1	35,6	35,6	33,5	30,6	28,0	26,7	28,8	28,6	29,3
23	35ХН3	–	36,1	37,2	36,5	36,9	35,1	31,4	28,0	–	27,3	–	–
24	20ХН4Ф (Э14)	37,7	37,7	37,7	36,9	35,4	33,5	31,2	28,8	27,6	27,1	–	–
25	20ХН4В (Э16)	26,2	26,2	26,2	–	–	32,6	–	–	28,5	–	–	–
25a	20ХН4В (Э16)	27,3	28,3	29,3	–	–	32,6	–	27,9	27,3	28,3	–	–
26	40Х3М	–	37,2	37,7	36,8	34,7	33,0	30,9	29,3	–	–	–	–
27	20ХЭФВМ	–	32,2	33,5	33,8	33,5	32,2	30,6	28,8	–	–	–	–
28	12Х5СМА	–	30,2	30,2	31,4	32,6	31,4	29,1	27,9	26,7	27,3	–	–
29	Х6М	–	36,6	–	35,1	34,2	33,5	33,5	–	–	–	–	–
30	30Г2	46,3	34,9	44,8	43,7	40,2	37,2	34,4	31,4	29,8	25,6	27,2	28,6
31	50С2Г	26,7	28,5	30,2	31,1	31,1	31,1	30,2	28,0	25,1	25,6	26,4	27,7
32	30ХГС (ЭИ179)	–	37,2	40,7	38,4	37,2	36,1	34,9	33,7	32,6	–	–	–

Таблица 1.31

**Средняя удельная теплоемкость низколегированных сталей (c_m , кДж/(кг·°C)),
в интервале температур от 50 до t °C [1]**

Марка стали	Температура t , °C					
	100	200	300	400	500	600
30X	0,494	0,507	0,523	0,536	0,565	0,586
12XН3А	–	–	–	0,528*	0,540*	0,565*
30Г2	0,477	0,494	0,511	0,528	0,548	0,582
50С2Г	0,502	0,511	0,528	0,544	0,565	0,595
30ХГС	–	–	0,511*	0,532*	0,548*	0,578*

Примечание: * В интервале температур от 20 до t °C.

Марка стали	Температура t , °C						
	700	800	900	1000	1100	1200	1300
30X	0,624	0,703	0,687	0,678	0,674	0,669	0,669
12XН3А	–	–	–	–	–	–	–
30Г2	0,615	0,687	0,669	0,662	0,653	0,662	0,569
50С2Г	0,628	0,695	0,687	0,678	0,678	0,678	0,678
30ХГС	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 1.32

Средняя удельная теплоемкость низколегированных сталей (c_m , кДж/(кг·°C)) [1]

Интервал температур, °C	Марки стали					Интервал температур, °C	Марки стали				
	30X	30Н3	30ХН3	30Г2	50С2Г		30X	30Н3	30ХН3	30Г2	50С2Г
50–100	0,486	0,481	0,494	0,477	0,498	700–750	1,662	0,955	1,176	1,449	0,904
100–150	0,107	0,502	0,507	0,494	0,511	750–800	0,636	0,603	0,976	0,821	1,365
150–200	0,523	0,523	0,523	0,511	0,523	800–850	0,653	0,624	0,569	0,557	0,611
200–250	0,540	0,536	0,540	0,528	0,540	850–900	0,636	0,641	0,582	0,536	0,624
250–300	0,557	0,548	0,561	0,544	0,557	900–950	0,645	0,649	0,628	0,590	0,628
300–350	0,582	0,569	0,582	0,565	0,578	950–1000	0,636	0,649	0,636	0,599	0,636
350–400	0,607	0,590	0,599	0,590	0,603	1000–1050	0,632	0,641	0,636	0,607	0,645
400–450	0,636	0,619	0,632	0,615	0,632	1050–1100	0,632	0,641	0,645	0,615	0,653
450–500	0,669	0,662	0,674	0,649	0,666	1100–1150	0,641	0,645	0,645	0,624	0,662
500–550	0,720	0,703	0,720	0,695	0,703	1150–1200	0,641	0,649	0,653	0,632	0,669
550–600	0,770	0,749	0,775	0,741	0,749	1200–1250	0,649	0,657	0,653	0,636	0,678
600–650	0,825	0,791	0,812	0,779	0,783	1250–1300	0,649	0,662	0,662	0,645	0,687
650–700	1,050	1,637	1,306	0,837	0,829						

Таблица 1.33

Плотность низколегированных сталей (ρ , кг/м³) [1]

Марка стали	Температура t , °C											
	0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
15М	7850	7850	7789	7757	7725	7690	7654	7615	–	–	–	–
12МХ	7819	7814	7788	7756	7722	7686	7650	7613	7577	–	–	–
15ХМ	7850	7850	7790	7758	7725	7690	7656	7622	–	–	–	–
15ХФ	7763	7758	7790	7759	7726	7693	7654	7618	7580	–	–	–
30X	7847	7842	7818	7787	7753	7718	7681	7643	7603	7619	7579	7525
30Н3	7859	7855	7830	7803	7772	7737	7700	7663	7643	7650	7598	7546
30ХН3	7851	7845	7824	7793	7760	7727	7693	7657	7625	7650	7596	7522
12Х5СМА	7710	7771	7791	–	–	–	7679	7649	7619	–	–	–
Х6М	7750	7750	–	7736	7729	7700	7667	7635	7605	–	–	–
30Г2	7854	7849	7826	7794	7760	7723	7685	7646	7605	7626	7590	7532
50С2Г	7729	7725	7703	7672	7639	7605	7570	7533	7495	7477	7442	7392

Таблица 1.34

Коэффициент температуропроводности низколегированных сталей ($\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$) [1]

Интервал температур, °С	Марки стали					Интервал температур, °С	Марки стали				
	30X	30НЗ	30ХНЗ	30Г2	50С2Г		30X	30НЗ	30ХНЗ	30Г2	50С2Г
50–100	12,22	10,17	9,17	12,31	7,19	600–650	5,19	5,08	5,28	5,78	5,00
100–150	11,81	9,58	9,11	11,92	7,39	650–700	4,58	2,22	3,06	5,00	4,58
150–200	11,00	9,39	9,00	11,39	7,39	700–750	2,50	2,50	3,19	2,69	4,50
200–250	10,50	9,28	8,81	10,81	7,39	750–800	3,81	5,50	6,11	4,50	2,50
250–300	10,00	9,19	8,39	10,31	7,31	800–850	5,50	5,03	5,39	5,58	5,31
300–350	9,31	8,50	8,19	9,89	7,00	850–900	5,56	5,28	5,56	5,89	5,39
350–400	8,61	8,11	7,89	9,00	6,81	900–950	5,81	5,31	5,69	5,94	5,50
400–450	7,89	7,50	7,39	8,19	6,50	950–1000	5,89	5,33	5,69	6,00	5,56
450–500	7,19	6,89	6,69	7,61	6,08	1000–1050	6,00	5,81	5,81	6,08	5,56
500–550	6,50	6,19	6,31	6,92	5,81	1050–1100	5,56	5,89	5,89	6,08	5,69
550–600	5,81	5,58	5,81	6,19	5,50						

Таблица 1.35

Коэффициент теплопроводности хромистых нержавеющей сталей ($\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$) [1]

Номер марки стали	Марка	Температура t, °С												
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
1а	X13	26,7	27,7	27,7	28,0	27,7	27,2	26,4	25,5	25,1	26,7	27,7	28,8	30,5
1б	X13	27,3	32,7	26,4	26,1	26,1	26,3	26,7	27,2	–	–	–	–	–
2	2X13	24,3	25,5	25,8	26,3	26,4	26,6	26,4	26,2	26,7	27,6	–	–	–
2б	2X13	20,5	22,1	23,6	24,7	25,6	26,2	26,7	27,3	27,9	28,5	–	–	–
3а	3X13	25,1	26,4	27,2	27,7	27,7	27,2	26,7	25,6	25,1	26,7	27,7	28,8	30,1
3б	3X13	–	25,1	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	24,7	–	–	–	–	–
4	4X13	28,8	28,0	29,1	29,3	29,2	28,8	28,4	28,0	–	–	–	–	–
5	X17	–	24,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
6	X28	–	20,9	21,7	22,7	22,7	23,4	24,3	25,00	–	–	–	–	–

Таблица 1.36

Средняя удельная теплоемкость хромистых нержавеющей сталей ($c_{\text{ср}}, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$) в интервале температур от 50 до t °С [1]

Номер марки стали	Марка	Температура t, °С												
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
1а	1X13	0,469	0,498	0,515	0,536	0,535	0,599	0,636	0,657	0,666	0,666	0,666	0,662	0,662
2а	2X13*	–	–	0,511	0,532	0,548	0,574	–	–	–	–	–	–	–
3а	3X13	0,469	0,498	0,511	0,532	0,561	0,595	0,641	0,674	0,691	0,682	0,682	0,678	0,678

Примечание: * Значения $c_{\text{ср}}$ в интервале температур от 20 до t °С.

Таблица 1.37

Плотность хромистых нержавеющей сталей ($\rho, \text{кг}/\text{м}^3$) [1]

Номер марки стали	Марка	Температура t, °С												
		0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
1	X13	7724	7719	7700	7663	7644	7612	7583	7553	7520	7485	–	–	–
1а	X13	7677	7672	7654	7626	7598	7569	7539	7492	7476	7445	–	–	–
2	2X13	7674	7669	7651	7623	7595	7566	7535	7491	7473	7440	–	–	–
3	3X13	7652	7648	7630	7602	7573	7544	7512	7483	7450	7442	–	–	–
3а	3X13	7749	7745	7725	7700	7671	7642	7611	7580	7548	7515	–	–	–
4	4X13	7745	7741	7722	7696	7667	7638	7608	7575	7542	7519	7523	7477	7425
5	X17	7720	7700	–	–	–	–	7590	7570	7540	7500	7524	7463	7397
6	X28	7650	7630	–	–	–	–	7520	7490	7460	7430	–	–	–

Таблица 1.38

**Коэффициент теплопроводности высоколегированных сталей
с особыми свойствами (λ , Вт/(м·°С)) [1]**

Номер марки стали	Марка	Температура t , °С						
		0	20	100	200	300	400	500
1	Г13	11,9	–	14,7	16,3	18,0	19,3	20,5
2	Г20Х12Ф	–	13,7	14,7	15,9	17,2	18,4	19,7
3	Х21Х15Т	–	13,7	14,7	15,9	17,2	18,4	19,7
4	Х13Н13К10	–	–	13,4	15,1	17,2	18,8	20,5
5	Х19Н10К47	–	–	14,7	16,3	18,0	19,7	21,4
6	Р18	24,3	–	25,9	27,2	28,0	28,5	28,0
7	ЭР	–	25,7	27,3	29,1	29,1	29,1	28,8
7а	ЭР	–	24,4	26,2	27,1	27,1	27,8	28,3
8	ЭХ12	–	33,0	36,1	36,4	34,3	32,6	30,8
9	ЭИ107	16,7	–	18,4	19,9	21,7	22,4	23,6

Номер марки стали	Марка	Температура t , °С						
		600	700	800	900	1000	1200	1300
1	Г13	21,8	22,6	23,5	24,3	25,6	26,7	28,0
2	Г20Х12Ф	20,9	22,1	23,3	–	–	–	–
3	Х21Х15Т	20,9	22,1	23,3	24,4	–	–	–
4	Х13Н13К10	22,2	23,8	25,7	27,7	–	–	–
5	Х19Н10К47	23,0	24,3	25,9	–	–	–	–
6	Р18	27,2	26,7	25,9	26,7	27,7	28,5	29,3
7	ЭР	28,5	28,3	27,8	27,3	–	–	–
7а	ЭР	27,9	26,9	–	–	–	–	–
8	ЭХ12	29,3	28,0	26,9	26,1	–	–	–
9	ЭИ107	24,7	28,5	–	–	–	–	–

Таблица 1.39

**Средняя удельная теплоемкость (c_m , кДж/(кг·°С)) высоколегированных сталей
с особыми свойствами в интервале температур от 50 до t °С [1]**

Номер марки стали	Марка	Температура t , °С									
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
1	Г13	0,519	0,528	0,540	0,553	0,561	0,569	0,574	0,578	0,582	0,595
6	Р18	0,410	0,410	0,423	0,431	0,439	0,448	0,456	0,465	0,473	0,486
9а	ЭИ107*	–	–	–	–	–	–	0,532	–	0,561	–

Номер марки стали	Марка	Температура t , °С								
		600	650	700	750	800	850	900	950	1000
1	Г13	0,603	0,607	0,611	0,611	0,615	0,619	0,619	0,624	0,624
6	Р18	0,494	0,502	0,515	0,528	0,540	0,548	0,561	0,561	0,565
9а	ЭИ107*	0,586	–	–	–	–	–	–	–	–

Номер марки стали	Марка	Температура t , °С					
		1050	1100	1150	1200	1250	1300
1	Г13	0,628	0,632	0,652	0,636	0,641	0,641
6	Р18	0,565	0,569	0,569	0,574	0,574	0,574
9а	ЭИ107*	–	–	–	–	–	–

Примечание:

* Значения c_m даны в интервале температур от 20 до t °С

Таблица 1.40

Средняя удельная теплоемкость (c_m , кДж/(кг·°C)) высоколегированных сталей с особыми свойствами [1]

Температурный интервал, °C	Г13	P18	Температурный интервал, °C	Г13	P18
50–100	0,519	0,410	700–750	0,649	0,716
100–150	0,540	0,427	750–800	0,649	0,716
150–200	0,565	0,435	800–850	0,657	0,682
200–250	0,565	0,452	850–900	0,666	0,737
250–300	0,599	0,465	900–950	0,666	0,582
300–350	0,607	0,487	950–1000	0,674	0,595
350–400	0,607	0,502	1000–1050	0,682	0,607
400–450	0,615	0,523	1050–1100	0,687	0,615
450–500	0,615	0,553	1100–1150	0,695	0,611
500–550	0,695	0,582	1150–1200	0,695	0,611
550–600	0,703	0,599	1200–1250	0,703	0,611
600–650	0,641	0,615	1250–1300	0,708	0,611
650–700	0,641	0,636			

Таблица 1.41

Плотность (ρ , кг/м³) высоколегированных сталей с особыми свойствами [1]

Номер марки стали	Марка	Температура t, °C											
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
1	Г13	7877	7834	7785	7730	7672	7632	7595	7538	7464	7378	7330	7263
2	Г20Х12Ф	7660	7620	7580	7540	7470	7420	7350	7280	–	–	–	–
3	Х21Х15Т	7660	7630	7580	7530	7460	7410	7360	7290	7220	–	–	–
6	P18	8696	8667	8635	8602	8569	8534	8498	8462	8425	8430	8372	8313

Таблица 1.42

Коэффициент температуропроводности ($a \cdot 10^6$, м²/с) высоколегированных сталей с особыми свойствами [1]

Температурный интервал, °C	Марка стали		Температурный интервал, °C	Марка стали		Температурный интервал, °C	Марка стали	
	Г13	P18		Г13	P18		Г13	P18
50–100	3,50	7,19	400–450	4,11	6,67	750–800	4,81	4,31
100–150	3,61	7,11	450–500	4,31	6,00	800–850	4,81	4,50
150–200	3,61	7,19	500–550	4,00	5,61	850–900	4,92	4,31
200–250	3,72	7,00	550–600	4,00	5,42	900–950	5,00	5,50
250–300	3,81	7,00	600–650	4,50	5,22	950–1000	5,11	5,50
300–350	3,89	6,81	650–700	4,61	5,00	1000–1050	5,19	5,50
350–400	4,11	6,61	700–750	4,69	4,42	1050–1100	5,03	5,50

Таблица 1.43

Коэффициент теплопроводности (λ) чугунов [1]

Чугун	Состав, %									λ , Вт/(м·°C), при температуре, °C				
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	S+P	0	100	200	300	400
Обыкновенный	2,61	2,46	0,45	–	–	–	–	–	–	48,5	46,1	44,1	42,8	41,9
	3,11	2,26	0,39	–	–	–	–	–	–	49,0	46,5	44,5	43,2	42,4
	3,20	1,56	0,72	–	–	–	–	–	–	53,2	50,6	48,6	46,5	45,1
Молибденохромистый	3,12	2,31	0,39	–	0,54	0,77	–	–	–	50,3	49,7	47,7	46,5	45,6
Молибденовый	2,56	2,20	0,63	–	–	0,58	–	–	–	50,5	49,4	47,7	46,5	45,4
Хромоникелевый	2,80	2,51	0,68	4,71	0,54	–	–	–	–	44,0	42,3	41,3	40,5	39,0
	3,41	1,03	0,65	1,49	0,54	–	–	–	–	49,2	48,6	47,0	45,8	44,3
Марганцевоникелевый	3,10	2,51	3,11	1,00	–	–	–	–	–	42,9	42,0	41,4	40,7	40,6
Никельрезист	2,41	1,80	0,62	13,70	3,37	–	6,41	–	–	35,9	33,8	32,4	31,5	31,3
Никросилал	1,91	6,42	–	18,65	2,02	–	–	–	–	30,4	29,3	27,9	26,7	26,3
Хромоалюминиевый	2,70	0,96	0,58	–	0,95	–	–	7,30	–	34,4	33,0	32,4	31,4	30,1
Медистый	3,18	1,58	0,69	–	–	–	1,58	–	–	48,7	47,1	44,4	43,8	41,1
	3,18	1,59	–	–	–	–	0,99	–	–	45,8	44,4	43,1	41,9	41,0
	3,18	1,49	–	–	–	–	1,98	–	–	48,1	46,0	43,5	41,4	38,8
	2,20	1,50	–	–	–	–	0,53	–	–	44,5	43,1	41,8	41,0	39,6
	3,16	1,44	–	–	–	–	3,10	–	–	47,6	46,0	44,0	42,6	41,1
	3,15	1,58	–	–	–	–	1,43	–	–	45,7	44,4	43,1	41,4	40,2
Обыкновенный чистый	3,16	1,54	–	–	–	–	–	–	–	47,6	45,9	44,1	43,1	41,6
	3,00	–	–	–	–	–	–	–	–	58,7	–	–	–	46,3
Серый чугун	3,08	1,24	0,94	–	0,08	–	0,36	–	+	54,5	53,0	51,0	48,6	45,8
	3,25	1,91	0,97	–	0,07	–	0,81	–	+	49,7	46,5	46,4	43,9	41,9
	3,32	1,52	2,43	–	0,01	–	0,71	–	+	51,3	49,0	47,0	44,4	42,3
	3,19	1,42	0,96	–	0,20	–	–	–	–	55,0	53,2	51,0	48,6	42,4
Отожженный ковкий чугун	2,80	0,39	0,10	–	0,09	–	0,06	–	+	–	47,6	42,7	45,3	45,4
Жидкий чугун	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	16,7*	–	–	–

Примечание. Плюсом обозначено наличие S+P, минусом – отсутствие.

* При 1400°C.

Таблица 1.44

Предел прочности (σ_b) различных сталей в зависимости от температуры [1]

Марка стали	Предел прочности σ_b , МН/м ² , при температуре, °С												Термическая обработка
	20	100	200	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
10	421,7	402,1	485,4	514,8	–	372,6	–	255,0	186,3	107,9	–	–	Нормализация 900–920 ⁰ С
15	396,2	366,8	437,4	429,5	–	394,2	–	277,5	–	147,1	–	75,5	Состояние поставки
30Х	833,6	764,9	774,7	794,3	784,5	647,2	603,1	500,1	–	–	–	–	Закалка 680 ⁰ С, масло отпуск 500 ⁰ С, НВ260–269
30ХМ	730,6	–	661,9	715,9	–	632,5	578,6	500,1	460,9	348,1	–	–	Закалка 870–880 ⁰ С, масло, отпуск 650 ⁰ С
X18H11B	559,0	–	–	–	–	–	–	392,3	–	362,8	304,0	245,2	Закалка 1050–1100 ⁰ С, 30 мин, воздух
1X14H14B2M	559,0	–	–	–	–	–	–	–	464,8	443,3	425,6	397,2	Нагрев 1100 ⁰ С, воздух
X23H13	649,2	–	–	–	–	–	–	–	580,6	523,7	466,8	379,5	Закалка 1050 ⁰ С, вода
X23H18	655,1	–	–	530,5	–	547,2	–	530,5	–	448,2	397,2	324,6	Закалка 1180 ⁰ С, вода, старение 800 ⁰ С, 4 ч
X18H25C2	838,5	–	686,5	733,5	–	711,0	–	686,5	622,7	568,8	–	429,5	Нагрев 1200 ⁰ С, вода, 800 ⁰ С, выдержка 8 ч
4X14H14B2M	777,7	–	–	–	–	–	–	–	570,7	491,3	439,3	338,3	Закалка 1175 ⁰ С, вода, старение 50 ⁰ С, 5 ч
12ХН3А	549,3- -578,6	519,8	514,8	539,4	–	465,8	441,3	348,1	–	201,0	–	–	Нормализация 880–900 ⁰ С, отпуск 650 ⁰ С, 3 ч
60С2	1044,4	–	961,1	951,2	–	706,1	–	441,3	–	–	–	–	Закалка 860 ⁰ С,масло, отпуск 550 ⁰ С
1Х13	603,1	–	529,6	–	–	490,3	–	362,8	–	225,6	–	–	Нагрев 1030–1050 ⁰ С, масло, отпуск 750 ⁰ С
1Х18Н9Т	539,4	431,5	372,7	284,4	–	259,9	–	294,2	397,2	279,5	294,2	289,3	Закалка 1130–1160 ⁰ С, воздух или вода, старение 800 ⁰ С, 10 ч или 700 ⁰ С, 20 ч

Основные свойства некоторых жароупорных сталей [1]

Тип, марка стали	Температура плавления, $t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Температура начала интенсивного окисления на воздухе $t_{ок}, ^\circ\text{C}$	Предел прочности при растяжении $\sigma_{в}, \text{МН/м}^2$	Условный предел ползучести при удлинении на 1% за 10000 ч $\sigma_{пл}, \text{МН/м}^2$	Допустимое напряжение $\sigma_{доп}, \text{МН/м}^2$	Область применения
Хромистые: X18 (ЭИ229)	1490–1510	850–900	490,3/200 441,3/400 245,2/600 (58,8–88,3)/800	88,3/500 39,2/600 9,8/700 3,9/800	25,5/600 6,9/700 1,470/800 –	Нержавеющие и окалиностойкие стали могут применяться до 800–900 $^\circ\text{C}$ в ненагруженном состоянии
Высокохромистые: X25 (ЭИ181)	1490–1510	1100–1150	490,3/400 416,8/600	98,07/500 29,4/600	24,5/600	Окалиностойкие стали могут применяться до 1100–1500 $^\circ\text{C}$ для деталей в ненагруженном состоянии, а также для выводов нагревателей печей до 1000 $^\circ\text{C}$; трубок для термопар (X25Т) и т.п.
X25Т (ЭИ439)	–	–	186,3/700 78,5/800	6,9/700 2,9/800	5,9/700	
X28 (ЭЖ27, ЭИ349)	–	–	39,2/900	0,294/850	1,47/800	
Сильхромовые: X9С2 (ЭСХ8)	1470–1490	800	(882,6–1078,6) / 20			Окалиностойкие стали могут применяться для деталей печей и выводов нагревателей соответственно до 850 и 1050 $^\circ\text{C}$
X25С3Н (ЭИ261)	1470–1490	1100	(980,7–1176,8) / 20			
Высоколегированные: X23Н18 (ЭИ417)	1400–1430	1000	(588,4–686,5)/20 (539,4–657,0)/200 (470,7–617,8)/400 (382,5–519,8)/600 (235,4–323,6)/800 (58,8–78,5)/1000	(68,6–78,5)/600 (30,4–39,2)/700 (9,8–19,6)/800	(49,0–68,6)/600 (24,5–36,3)/700 (9,8–17,7)/800 (4,9–6,9)/900 (1,96–2,9)/1000	Окалиностойкие и жаропрочные стали могут применяться для изготовления нагруженных деталей до 900 и 1000 $^\circ\text{C}$ соответственно
X20Н35	1400–1420	1100	588,4/20 411,9/700 343,2/800 166,7/900 78,5/1000	37,3/700 21,6/800 9,8/900 1,96/1000	24,5/700 11,8/800 4,9/900 1,470/1000	

Примечание: В знаменателе дается температура ($^\circ\text{C}$) определения соответствующих свойств.

Таблица 1.46

Средняя удельная теплоемкость (c_m) и удельная энтальпия (h) серых чугунов различного состава [1]

Температура $t, ^\circ\text{C}$	$c_m,$ кДж/(кг $^\circ\text{C}$)	$h,$ кДж/кг	$c_m,$ кДж/(кг $^\circ\text{C}$)	$h,$ кДж/кг	$c_m,$ кДж/(кг $^\circ\text{C}$)	$h,$ кДж/кг	$c_m,$ кДж/(кг $^\circ\text{C}$)	$h,$ кДж/кг
	Состав, %							
	3,71C; 1,5 Si; 0,63 Mn; 0,147 P; 0,069 S		3,72C; 1,41 Si; 0,88 Mn; 0,54 P; 0,078 S		3,61C; 2,02 Si; 0,80 Mn; 0,88 P; 0,080 S		2,2C; 1,48 Si; 0,73 Mn; 0,12 P; 0,023 S	
100	–	–	–	–	–	–	0,5443	54,43
200	0,4605	92,11	0,3768	75,36	0,2901	57,99	–	–
300	0,4932	147,92	0,4363	130,84	0,3761	113,46	0,5582	167,47
400	0,5079	203,14	0,4652	186,06	0,4220	168,73	0,5652	226,09
450	–	–	–	–	0,4367	196,57	–	–
500	0,5171	258,53	0,4836	241,79	0,4480	223,99	0,5862	293,08
550	0,5234	287,84	0,4911	270,05	0,4576	251,63	–	–
600	0,5346	320,83	0,5024	301,45	0,4710	282,61	0,6071	364,25
650	0,5548	360,48	0,5192	337,46	0,4861	315,89	–	–
700	0,6025	421,82	0,5543	387,91	0,5125	358,81	0,6400	447,99
750	0,6477	485,84	0,6125	459,50	0,5681	426,22	–	–
800	0,6661	532,98	0,6372	509,78	0,6075	486,09	0,6908	552,66
850	0,6736	572,75	–	–	0,6251	531,30	–	–
900	0,6766	608,76	0,6548	590,34	0,6305	568,57	0,7118	640,58
950	0,6766	642,67	0,6556	623,00	0,6343	600,81	–	–
1000	0,6753	675,33	0,6544	654,40	0,6322	632,21	0,7201	720,13
1050	0,6741	707,57	0,6519	684,54	0,6301	661,51	–	–
1100	0,6720	738,97	0,6510	715,94	0,6301	692,92	0,7308	803,87
1150	0,8847	1017,39	0,8608	988,08	0,8428	967,15	–	–
1200	0,8721	1046,70	0,8495	1019,48	0,8323	998,55	0,9071	1088,57
1250	0,8608	1076,01	0,8382	1047,96	0,8206	1025,77	–	–
1300	0,5812	1106,57	0,8281	1076,01	0,8110	1054,24	0,9082	1180,68
1350	0,8420	1136,72	0,8173	1103,22	0,8001	1080,19	–	–

Таблица 1.47

Химический состав некоторых огнеупорных изделий, % [1]

Изделия	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (FeO)	Cr ₂ O ₃	CaO	MgO	Щело- чи	ZrO ₂	C	SiC	Примеси других окислов
Динасовые	95–96	следы	1–2	0,5–1,0	–	1,3–2,5	≤0,1	≤0,8	–	–	–	–
Карборундовые	4–30	–	0,2–20	0,5–2	–	0,5–2	0,5	следы	–	–	93–50	–
Алюмосиликатные (бокситовые и диаспоровые)	14–42	2–4	80–50	1–5	–	≤1,5	–	≤3	–	–	–	–
Шамотные	48–65	1–3	46–30	0,5–3,5	–	0,2–1,5	0,2–1,0	0,1–3,5	–	–	–	–
Магнезитовые	0,5–3,5	–	0,5–0,2	0,2–8,0	–	0,2–8,0	95–86	0,5–3	–	–	–	–
Форстеритовые (оливиновые)	30–40	до 0,5	1,2–2,1	7–9	до 0,7	≤0,7	60–50	следы	–	–	–	–
Хромитовые	4–9	–	8–18	10–20	30–58	≤0,5	23–18	–	–	–	–	–
Хромомагнезитовые	4–8	–	8–13	8–13	20–35	0,5–2,5	52–30	–	–	–	–	–
Графитовые	13–45	–	6–30	≤1,5	–	следы	следы	–	–	80–25	–	–
Коксовые	–	–	–	–	–	–	–	–	–	95–90	–	10–5
Цирконовые	0,5–15	≤1,5	≤3	≤5	–	–	–	–	98–80	–	–	–
Циркониевые	30–35	–	≤3	≤3	–	≤3	≤1	–	55–66	–	–	–
Корундовые	0,5–45	≤3	99–50	0,5–4	–	–	–	–	–	–	–	–
Плавленные муллитовые	16–20	≤5	73–70	0,3–2,0	–	≤2,0	–	≤2,0	–	–	–	–
Силлиманитовые	30–46	≤1,5	66–50	≤2,5	–	≤0,5	≤0,5	≤2	–	–	–	–

Таблица 1.48

Теплофизические свойства огнеупорных изделий и материалов [1]

Наименование огнеупора	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³		Удельная теплоемкость c , кДж/(кг ⁰ С)	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м ⁰ С)	Удельное электросопротивление ρ_{Ω} , Ом·см, при t , ⁰ С		
	с порами	без пор			800	1200	1600
Графитовые изделия	1,6	2,2	0,837	$162,8 - 40,7 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	–	–	–
Динасовый кирпич	1,9–1,93	2,38–2,5	$0,837 + 0,25 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	$0,93 + 0,69 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	200	9,14	1,5
Карборундовые изделия (карбофракс)	2,3–2,6	3,1–3,2	$0,96 + 0,147 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	$20,9 - 10,5 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	800	40	0–0,8
Корундовые (алундовые) изделия	2,6–2,9	3,7–3,9	$0,79 + 0,42 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	$2,1 + 1,9 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	1000	100	5,2–4,0
Рекристаллизованный корунд	3,75–3,85	3,8–3,9	–	$29,1^{*2}, 5,8^{*2}$	–	–	–
Магнезитовый кирпич	2,6–2,8	3,0–3,2	$1,05 + 0,29 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	$4,7 - 1,7 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	1000	100–200	–
Изделия из плавленного муллита	2,1–2,4	3,0–3,3	$1,05 + 0,25 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	–	–	–	–
Плавленный магнезитовый кирпич	2,7–2,8	3,5–3,6	–	–	4000	100–200	1,0–2,0
Окись бериллия	–	3,0	$0,13 + 0,52 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	$1,9 - 3,7^{*3}$	–	10^9	–
Окись тория	–	10	$0,25^{*1}$	Очень низкий	–	10^7	–
Полуокислый огнеупорный кирпич	1,85–1,95	2,5–2,6	$- 0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	$0,87 + 0,52 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	–	4–6	–
Строительный (красный) кирпич	1,4–1,6	2,5–2,6	0,92	$0,81 + 0,47 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	–	–	–
Силлиманитовые и муллитовые изделия	2,2–2,4	2,8–3,0	$0,84 + 0,25 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	$1,69 - 0,23 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	180	11,5	3,5
Угольные изделия	1,35–1,5	1,8–2,1	0,837	$23,3 \pm 34,9 \cdot 10^{-3} t_{CP}^{*4}$	–	–	–
Хромитовый кирпич	3,0–3,2	3,8–4,2	$0,84 + 0,29 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	$1,28 + 0,41 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	3,0	0,5–0,1	0,05–0,01
Хромомагнезитовый кирпич	2,8–2,9	3,7–3,8	–	$1,9 - 2,1^{*5}$	–	–	–
Термостойкий хромомагнезитовый кирпич	2,75–2,85	3,6–3,8	–	$4,1 - 1,11 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	–	–	–
Циркониевые изделия	3,3	4,5–5,0	$0,54 + 0,13 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	$1,3 - 0,64 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	1000 – 10000	10	–
Цирконовые изделия	3,2–3,3	4,0–4,5	$0,63 + 0,13 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	–	–	10,0	–
Шамотный кирпич	1,8–1,9	2,54–2,62	$0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	$0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} t_{CP}$	7–15	1,0–1,5	0,6

Примечание. *¹ При 25⁰С. *² При 100⁰С. *³ При 20⁰С. *⁴ До 1000⁰С. *⁵ От 0 до 70⁰С.

Таблица 1.49

**Средняя удельная теплоемкость огнеупорных материалов (c_m , кДж/(кг·°C))
в интервале температур от 0 до t , °C [1]**

t , °C	Шамот	Динас	Корунд	Магнезит	t , °C	Шамот	Динас	Корунд	Магнезит
50	0,825	0,737	–	–	800	1,059	1,097	1,139	1,151
100	0,837	0,779	0,849	–	850	1,076	1,109	–	–
150	0,854	0,816	–	–	900	1,089	1,122	1,202	1,172
200	0,871	0,849	0,883	0,934	950	1,105	1,130	–	–
250	0,888	0,879	–	–	1000	1,122	1,139	1,273	1,193
300	0,900	0,909	0,934	0,996	1050	1,139	1,147	–	–
350	0,917	0,929	–	–	1100	1,151	1,156	–	–
400	0,934	0,950	0,925	1,047	1150	1,168	1,164	–	–
450	0,950	0,967	–	–	1200	1,185	1,172	–	–
500	0,963	0,980	1,038	1,080	1250	1,202	1,176	–	–
550	0,979	0,988	–	–	1300	1,214	1,185	–	–
600	0,996	1,017	1,051	1,105	1350	1,231	1,189	–	–
650	1,013	1,043	–	–	1400	1,248	1,193	–	–
700	1,026	1,063	1,084	1,126	1450	1,264	–	–	–
750	1,043	1,080	–	–	1500	1,277	–	–	–

Таблица 1.50

Удельная теплоемкость (c) некоторых теплоизоляционных материалов при 20°С [1]

Материал	c , кДж/(кг·°C)	Материал	c , кДж/(кг·°C)
Асбест (волокно)	0,837	Минеральная вата	0,921
Асбест (картон, шнур и т.п.)	0,837	Пенобетон	0,837
Асбоцементные плиты	0,837	Соломит	1,507
Войлок (шерстяной)	1,884	Стекловолокно	0,837
Диатом	0,837	Торфяные плиты	2,093
Зола и шлаки	0,754	Торф сфагнум	2,093
Камышит	1,507	Фибролит	2,303

Таблица 1.51

**Зависимость коэффициента теплопроводности (λ) от температуры
для теплоизоляционных материалов [1]**

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Формула для определения λ , Вт/(м·°С)
Алюминиевая фольга с воздушными прослойками:		
гладкая	3	$0,052+1,4 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
мятая	5	$0,698+1,98 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Асбестовый картон	100–1200	$0,157+1,4 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Асбестовая ткань	600	$0,126+2,6 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Асбестовый шнур	800	$0,128+1,5 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Асбовермикулитовые изделия	250	$0,078+1,9 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
	300	$0,084+2,09 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Асбозурит	700	$0,162+1,69 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Бетоны с заполнителем:		
диатомит с глиноземистым цементом (4:1 по объему)	960	$0,202+1,7 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
вспученная глина с глиноземистым цементом (4:1 по объему)	1400	$0,428+1,3 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
пористый каолин с глиноземистым цементом (6:1 по объему)	1050	$0,28+1,4 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Войлок строительный шерстяной	300	$0,047+1,9 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Вулканист	400	$0,078+1,7 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Диатомит инзенский (порода)	680	$0,171+2,32 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Диатомовые обожженные изделия	500	$0,10+2,33 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
	600	$0,127+2,33 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
	700	$0,16+3,1 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Легковесный кирпич	900	$0,28+2,4 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Легковес с выгорающими добавками	1000	$0,29+2,6 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
	1300	$0,41+3,5 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Минераловатные плиты на связке из крахмала или глины	350	$0,077+1,6 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
	450	$0,088+1,6 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Ньювель	400–465	$0,087+0,64 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Огнеупорный легковес	750	$0,14+2,7 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Пенодиатомовый кирпич	400	$0,08+2,2 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Пенолегковес	540–610	$0,09+1,6 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Пеношамот	600	$0,10+1,45 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
	950	$0,28+1,7 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Полукислый шамот	1830	$0,66+3,7 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Пробковая плита	250	$0,07+1,6 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Пробка экспанзит	130	$0,05+1,4 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Совелит формованный	400	$0,088+0,09 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Торфяные плиты:		
прессованные	200	$0,07+1,4 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
формованные	150	$0,06+1,4 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Ультралегковес	350	$0,08+3,02 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Химлегковес	740	$0,15+1,3 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Шевелин:		
одинарный	260	$0,052+1,5 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
двойной	140	$0,47+1,5 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Шлаковая пробка	350	$0,08+2,2 \cdot 10^{-4} t_{CP}$
Шлак доменный	800	0,150*
	700	0,130*
	600	0,115*
Шлак гранулированный	700	0,125*
	600	0,110*
	500	0,095*
	400	0,08*
Шлак котельный	1300	0,32*
	1200	0,29*
	1100	0,26*
	1000	0,23*
	900	0,20*

Примечание.* При 30°С.

Таблица 1.52

Средние удельные теплоемкости высокоогнеупорных материалов (c_m , кДж/(кг·°C)) [1]

Материал	c_m в интервале температур от указанной до t , °C							
	100	200	400	600	800	1000	1200	1400
Корунд (искусственный), от 20°C	–	0,883	0,967	1,051	1,139	1,273	–	–
Глинозем, от 15°C	0,873	0,921 (95)	1,005 (420)	1,029 (520)	–	–	–	–
Муллит, от 20°C	–	0,674	0,699	0,724	0,733	–	–	–
Кианит (борисовский), от 20°C	–	–	0,963	1,029	1,068	1,105	1,130	–
Андалузит (Семиз–Бугу), от 20°C	–	–	0,939	1,089	1,156	1,185	1,202	–
Силлиманит, от 0°C	–	–	0,959	1,029	1,068	1,080	1,097	–
Муллитовые изделия, от 20°C	–	–	–	1,089	–	–	1,202	–
Магнезитовые изделия 88% MgO ₂ , от 25°C	–	–	–	1,109 (605)	1,147 (825)	1,193 (1042)	1,223 (1115)	–
Спекшийся магнезит	–	1,059	1,151	1,214	1,323	1,357	1,461 (1300)	–
Серпентин, от 20°C	–	–	1,181	1,306	1,691	1,725	1,612	–
Шпинель, от 0°C	–	0,896 (0–243)	0,959 (339)	1,047 (632)	1,068 (886)	1,076 (1042)	–	–
Известь (плавленая), от 0°C	0,699	0,720 (190)	0,758 (375–400)	0,808 (590–680)	–	–	–	–
Оксид циркония (99% ZrO ₂), от 25°C	0,549 (до 30)	–	–	0,574 (400–800)	0,528– 561,3	0,657	0,699	0,733
Циркон (ильменский), от 20°C	–	–	0,674	0,699	0,729	0,762	0,791	–
Хромитовые изделия	–	0,745 (218)	0,879 (382)	0,925 (579)	0,900 (894)	–	–	–
Хромит (халиловский), от 20°C	–	–	0,929	0,938	1,026	1,135	1,047	–
Карборунд (кристаллический), от 0°C	–	0,976	1,159	1,151	0,942	0,955	–	–
Карборундовые изделия типа карбофракс:								
90% SiC	–	–	–	1,055	1,068	1,109	1,114	1,143
92% SiC	–	–	–	–	–	1,105	1,114	1,214 (1350)
Графит	0,873	1,063 (138)	–	–	–	1,955 (977)	–	1,98 (0–2000)

Примечание. В скобках даны температуры конца интервала, всего интервала или температура, при которой проведено исследование.

Таблица 1.53

**Коэффициент теплопроводности (λ) теплоизоляционных материалов
в зависимости от влажности и температуры (t) [1]**

Материал различной плотности ρ , кг/м ³	Температура, t °С	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), при влажности W, %						
		0	10	20	30	40	50	60
Асбестоцементные теплоизоляционные плиты: $\rho=410^{*2}$	65	0,105	0,291	0,384	0,436	0,483	0,523	0,552
	10	0,093	0,122	0,163	0,198	0,227	0,256	0,279
Газостекло (пеностекло): $\rho=280^{*2}$	65	0,069	0,106	0,139	0,167	0,186	–	–
	5	0,058	0,072	0,087	0,101	0,116	–	–
Диатомовые обожженные изделия * ¹ :	$\rho=1000$	20–30	0,231	0,319	0,392	0,459	–	–
	$\rho=800$	20–30	0,174	0,250	0,302	0,361	0,413	–
	$\rho=600$	20–30	0,128	0,187	0,230	0,271	0,308	0,350
	$\rho=400$	20–30	0,087	0,126	0,157	0,183	0,206	0,227
	$\rho=200$	20–30	0,064	0,081	0,099	0,116	0,129	0,142
Диатомовые обожженные кирпичи * ² :	$\rho=740$	10	0,163	0,267	0,384	0,488	0,605	0,709
	$\rho=660$	5	0,116	0,169	0,221	0,279	0,326	0,378
	$\rho=550$	20	0,116	0,186	0,244	0,285	0,302	0,319
Диатомовая крошка* ² :	$\rho=510$	0	0,081	0,110	0,139	0,160	0,186	0,211
		10	0,084	0,122	0,151	0,179	0,204	0,233
		20	0,086	0,134	0,174	0,209	0,238	0,267
		30	0,088	0,163	0,215	0,259	0,297	0,331
		40	0,091	0,204	0,267	0,319	0,366	0,407
		50	0,093	0,238	0,326	0,395	0,448	0,494
		60	0,095	0,291	0,399	0,488	0,561	0,616
		70	0,097	0,378	0,523	0,628	0,709	0,768
Камышит* ¹ :	$\rho=400$	20–30	0,107	0,133	0,154	0,172	0,187	0,204
	$\rho=300$	20–30	0,093	0,113	0,119	0,134	0,142	0,154
	$\rho=200$	20–30	0,069	0,078	0,087	0,094	0,102	0,106
Минеральная вата * ¹ :	$\rho=400$	20–30	0,076	0,087	0,105	0,116	0,130	0,145
	$\rho=300$	20–30	0,060	0,069	0,078	0,087	0,093	0,100
	$\rho=200$	20–30	0,046	0,052	0,057	0,062	0,066	0,069
Минеральная вата * ² :	$\rho=350$	20	0,058	0,081	0,100	0,119	0,136	0,155
	$\rho=200$	20	0,047	0,053	0,059	0,065	0,072	0,078
	$\rho=120$	20	0,035	0,037	0,042	0,044	0,047	0,049

Продолжение табл. 1.53

Материал различной плотности ρ , кг/м ³	Температура, t °С	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), при влажности W, %						
		0	10	20	30	40	50	60
Пенобетон* ¹ :								
$\rho=1200$	20–30	0,319	0,433	0,535	–	–	–	–
$\rho=1100$	20–30	0,286	0,389	0,485	0,569	–	–	–
$\rho=1000$	20–30	0,254	0,352	0,439	0,516	–	–	–
$\rho=900$	20–30	0,221	0,308	0,392	0,462	0,516	–	–
$\rho=800$	20–30	0,192	0,272	0,343	0,409	0,469	–	–
$\rho=700$	20–30	0,169	0,241	0,308	0,366	0,419	0,454	–
$\rho=600$	20–30	0,149	0,207	0,262	0,309	0,355	0,397	–
$\rho=500$	20–30	0,134	0,180	0,219	0,256	0,286	0,316	0,347
$\rho=400$	20–30	0,119	0,151	0,183	0,215	0,241	0,267	0,291
$\rho=300$	20–30	0,107	0,134	0,163	0,179	0,198	0,215	0,233
Пенобетон автоклавный:								
$\rho=460$	10	0,097	0,139	0,177	0,207	0,233	0,250	0,267
	20	0,099	0,151	0,192	0,227	0,256	0,277	0,300
	30	0,101	0,165	0,216	0,258	0,291	0,314	0,335
	40	0,104	0,189	0,254	0,300	0,339	0,372	0,398
	50	0,106	0,216	0,291	0,355	0,407	0,449	0,484
	60	0,107	0,245	0,336	0,409	0,472	0,530	0,579
	70	0,110	0,286	0,397	0,488	0,586	0,634	0,695
То же * ² :								
$\rho=280$	65	0,087	0,137	0,186	0,241	0,291	0,343	0,395
	5	0,058	0,069	0,088	0,093	0,105	0,116	0,128
Песок* ² :								
$\rho=1380$	0–40	0,349	0,663	0,930	–	–	–	–
$\rho=1640$	0–40	0,372	0,965	1,232	–	–	–	–
Соломит* ¹ :								
$\rho=150$	20–30	0,058	0,063	0,069	0,076	0,081	0,087	0,093
Стеклянная вата* ¹ :								
$\rho=200$	20–30	0,047	0,052	0,059	0,064	0,069	0,074	0,079
$\rho=150$	20–30	0,041	0,044	0,050	0,053	0,057	0,060	0,064
Шлак гранулированный* ¹ :								
$\rho=700$	20–30	0,145	0,198	0,247	0,288	0,326	0,361	–
$\rho=600$	20–30	0,128	0,174	0,211	0,245	0,279	0,314	–
$\rho=500$	20–30	0,110	0,151	0,180	0,209	0,238	0,267	0,297
$\rho=400$	20–30	0,093	0,131	0,156	0,180	0,204	0,224	0,244
Шлак доменный* ¹ :								
$\rho=800$	20–30	0,174	0,247	0,302	0,351	0,392	0,424	–
$\rho=700$	20–30	0,151	0,211	0,262	0,302	0,338	0,369	–
$\rho=600$	20–30	0,134	0,183	0,228	0,267	0,302	0,337	–
Шлак котельный* ¹ :								
$\rho=1300$	20–30	0,372	0,505	0,622	–	–	–	–
$\rho=1200$	20–30	0,337	0,454	0,555	–	–	–	–
$\rho=1100$	20–30	0,302	0,407	0,500	0,582	–	–	–
$\rho=1000$	20–30	0,267	0,361	0,435	0,506	–	–	–
$\rho=900$	20–30	0,233	0,319	0,388	0,436	–	–	–

Материал различной плотности ρ , кг/м ³	Температура, t °С	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), при влажности W, %						
		0	10	20	30	40	50	60
Торфяные плиты* ¹ :								
$\rho=300$	20–30	0,067	0,087	0,104	0,119	0,135	0,152	0,167
$\rho=250$	20–30	0,061	0,073	0,087	0,102	0,114	0,126	0,137
$\rho=200$	20–30	0,052	0,064	0,076	0,086	0,094	0,105	0,114
$\rho=150$	20–30	0,045	0,055	0,060	0,069	0,076	0,081	0,087
Торф сфагнум* ¹ :								
$\rho=400$	20–30	0,128	0,147	0,171	0,192	0,209	0,227	0,244
$\rho=300$	20–30	0,107	0,119	0,135	0,147	0,158	0,171	0,184
$\rho=200$	20–30	0,087	0,098	0,107	0,116	0,123	0,128	0,135
$\rho=100$	20–30	0,069	0,076	0,080	0,086	0,088	0,091	0,094

*¹ Коэффициенты теплопроводности определены при стационарном режиме. *² То же при нестационарном (регулярном) режиме.

Таблица 1.54

Интегральная степень черноты металлов в направлении нормали [9]

Металл	Температура поверхности * ¹ , К	ϵ
Алюминий:		
тщательно полированный листовой	477–866	0,038–0,06
блестящая фольга	294	0,04
полированный листовой	373	0,095
сильно окисленный	366–811	0,20–0,33
Висмут полированный	353	0,34
Вольфрам:		
чистый	311–811	0,03–0,08
нить накала	300	0,032
нить накала	3320	0,39
Железо:		
электролитическое, тщательно полированное	311–533	0,05–0,07
полированное	700–755	0,14–0,38
сразу же после обработки наждачной бумагой	311	0,24
сварочное железо, полированное	311–533	0,28
чугун сразу же после обработки	311	0,44
листовое железо, покрытое красной ржавчиной	293	0,61
после травления кислотой		
чугун окисленный при 866 К	477–866	0,64–0,78
чугун, имеющий шероховатую сильно окисленную поверхность	311–533	0,95
Золото:		
тщательно полированное	366–866	0,018–0,035
полированное	403	0,018

Продолжение табл. 1.54

Металл	Температура поверхности * ¹ , К	ε
Латунь:		
тщательно полированная	533–644	0,028–0,031
полированная	366	0,09
матовая	322–622	0,22
окисленная	477–811	0,60
Магний полированный	311–533	0,07–0,13
Медь:		
тщательно полированная	311	0,02
полированная	311–533	0,04–0,05
шабренная блестящая	311	0,07
слегка полированная	311	0,15
окисленная до черноты	311	0,78
Молибден:		
полированный	311–533	0,05–0,08
полированный	811–1647	0,10–0,18
полированный	2760	0,29
Нержавеющая сталь:		
инконель Х полированная	89–755	0,19–0,20
инконель В полированная	89–755	0,19–0,22
301 полированная	297	0,16
310 полированная	1089	0,39
316 полированная	477–1310	0,24–0,31
Никель:		
электролитический	311–533	0,04–0,06
технически чистый, полированный	500–650	0,07–0,087
осажденный электролитическим способом на железо, неполированный	293	0,11
листовой, окисленный при 866 К	472–872	0,37–0,48
окись никеля	922–1533	0,59–0,86
Олово:		
листовое полированное	307	0,05
блестящее луженое железо	297	0,043–0,064
Платина:		
электролитическая	533–811	0,06–0,10
полированная листовая	500–900	0,054–0,104
Ртуть неокисленная	277–366	0,09–0,12

Металл	Температура поверхности ^{*1} , К	ϵ
Свинец:		
полированный	311–533	0,06–0,08
шероховатый неокисленный	311	0,43
окисленный при 866 К	311	0,63
Серебро полированное	311–811	0,01–0,03
Сталь:		
полированная листовая	89–255	0,07–0,08
полированная листовая	225–422	0,08–0,14
мягкая полированная	533–922	0,27–0,31
листовая с окалиной, образующейся при прокатке	294	0,66
листовая с шероховатым слоем окисла	294	0,81
Тантал	1647–2760	0,2–0,3
Хром полированный	311–1366	0,08–0,40
Цинк:		
полированный	311–811	0,02–0,05
оцинкованные листы, достаточно блестящие	311	0,23
серый окисленный	294	0,23–0,28

^{*1} В том случае, когда указываются интервалы температур и степеней черноты, можно использовать линейную интерполяцию этих величин.

Таблица 1.55

Интегральная степень черноты диэлектриков в направлении нормали [9]

Диэлектрик	Температура поверхности ^{*1} , К	ϵ
Асбест:		
бумага	311	0,93
картон	311	0,96
Бетон шероховатый	311	0,94
Бумага:		
белая	311	0,96
рубериод	311	0,91
Вода (глубокая)	273–373	0,96
Гипс	311	0,91
Дерево:		
дуб строганный	294	0,90
бук	343	0,94
Карбид кремния	422–922	0,83–0,96

Диэлектрик	Температура поверхности ^{*1} , К	ϵ
Кирпич:		
белый огнеупорный	1366	0,29
шамотный	1256	0,75
шероховатый красный	311	0,93
Краска:		
масляная, всех цветов	373	0,92–0,96
лаковая, тускло черная	311–366	0,96–0,98
Лед:		
гладкий	273	0,966
шероховатые кристаллы	273	0,985
Мрамор белый	311	0,95
Окись алюминия на инконеле	811–1366	0,65–0,45
Окись магния огнеупорная	422–755	0,69–0,55
Рокайд А на молибдене	389–1089	0,79–0,60
Сажа от свечи	366–533	0,95
Слюда	311	0,75
Фарфор глазурированный	294	0,92
Шифер	311	0,67–0,80
Эбонит	293	0,92

^{*1} В том случае, когда указываются интервалы температур и степеней черноты, можно использовать линейную интерполяцию этих величин.

1.2. Физические свойства жидкостей

Таблица 1.56

Физические свойства трансформаторного масла [1]

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^4$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	Pr
0	892,5	1,549	0,1123	8,14	629,8	70,5	6,80	866
10	886,4	1,620	0,1115	7,83	335,5	37,9	6,85	484
20	880,3	1,666	0,1106	7,56	198,2	22,5	6,90	298
30	874,2	1,729	0,1008	7,28	128,5	14,7	6,95	202
40	868,2	1,788	0,1090	7,03	89,4	10,3	7,00	146
50	862,1	1,846	0,1082	6,80	65,3	7,58	7,05	111
60	856,0	1,905	0,1072	6,58	49,5	5,78	7,10	87,8
70	850,0	1,964	0,1064	6,36	38,6	4,54	7,15	71,3
80	843,9	2,026	0,1056	6,17	30,8	3,66	7,20	59,3
90	837,8	2,085	0,1047	6,00	25,4	3,03	7,25	50,5
100	831,8	2,144	0,1038	5,83	21,3	2,56	7,30	43,9
110	825,7	2,202	0,1030	5,67	18,1	2,20	7,35	38,8
120	819,6	2,261	0,1022	5,50	15,7	1,92	7,40	34,9

Таблица 1.57

Физические свойства масла МС-20 [2]

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^4$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	Pr
-10	990,3	1,915	0,136	7,75	—	—	6,24	—
0	903,6	1,980	0,135	7,58	—	—	6,24	—
+10	897,9	2,010	0,135	7,44	—	—	6,31	—
20	892,3	2,043	0,134	7,30	10026	1125	6,35	15400
30	886,6	2,072	0,132	7,19	4670	526	6,38	7310
40	881,0	2,106	0,131	7,08	2433	276	6,42	3890
50	875,3	2,135	0,130	7,00	1334	153	6,46	2180
60	869,6	2,165	0,129	6,86	798,5	91,9	6,51	1340
70	864,0	2,198	0,128	6,75	498,3	58,4	6,55	865
80	858,3	2,227	0,127	6,67	336,5	39,2	6,60	588
90	852,7	2,261	0,126	6,56	234,4	27,5	6,64	420
100	847,0	2,290	0,126	6,44	171,7	20,3	6,69	315
110	841,3	2,320	0,124	6,36	132,4	15,7	6,73	247
120	835,7	2,353	0,123	6,25	101,0	12,1	6,77	193
130	830,0	2,382	0,122	6,17	79,76	9,61	6,82	156
140	824,4	2,420	0,121	6,08	61,80	7,50	6,87	123
150	818,7	2,445	0,120	6,00	53,17	6,50	6,92	108

Таблица 1.58

Физические свойства масла МК [2]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$a\cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu\cdot 10^4, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta\cdot 10^4, \text{K}^{-1}$	Pr
10	911,0	1,645	0,1510	9,94	35414	3883	8,56	39000
20	903,	1,712	0,1485	9,58	18560	1514	8,64	15800
30	894,5	1,758	0,1461	9,28	6180	691,2	8,71	7450
40	887,5	1,804	0,1437	8,97	3031	342,0	8,79	3810
50	879,0	1,851	0,1413	8,69	1638	186,2	8,86	2140
60	871,5	1,897	0,1389	8,39	961,4	110,6	8,95	1320
70	864,0	1,943	0,1363	8,14	603,3	69,3	9,03	858
80	856,0	1,989	0,1340	7,89	399,3	46,6	9,12	591
90	848,2	2,035	0,1314	7,61	273,7	32,3	9,20	424
100	840,7	2,081	0,1290	7,33	202,1	24,0	9,28	327
110	838,0	2,127	0,1264	7,11	145,2	17,4	9,37	245
120	825,0	2,173	0,1240	6,92	110,4	13,4	9,46	193,5
130	817,0	2,219	0,1214	6,69	87,31	10,7	9,54	160,0
140	809,2	2,265	0,1188	6,53	70,34	8,70	9,65	133,3
150	801,6	2,311	0,1168	6,25	56,90	7,10	9,73	113,5

Таблица 1.59

Физические свойства ртути и некоторых расплавленных металлов [2]

Металл	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$a\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu\cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
Ртуть Hg $t_{\text{пл}} = -38,9^\circ\text{C}$; $t_{\text{кип}} = 357^\circ\text{C}$; $r_{\text{пл}} = 11,72 \text{ кДж/кг}$.	20	13550	0,1390	7,90	4,36	11,4	2,72
	100	13350	0,1373	8,95	4,89	9,4	1,92
	150	13230	0,1373	9,65	5,30	8,6	1,62
	200	13120	0,1373	10,3	5,72	8,0	1,40
	300	12880	0,1373	11,7	6,64	7,1	1,07
Олово Sn $t_{\text{пл}} = 231,9^\circ\text{C}$; $t_{\text{кип}} = 2270^\circ\text{C}$; $r_{\text{пл}} = 58,2 \text{ кДж/кг}$.	250	6980	0,255	34,1	19,2	27,0	1,41
	300	6940	0,255	33,7	19,0	24,0	1,26
	400	6865	0,255	33,1	18,9	20,0	1,06
	500	6790	0,255	32,6	18,8	17,3	0,92
Висмут Bi $t_{\text{пл}} = 271^\circ\text{C}$; $t_{\text{кип}} = 1477^\circ\text{C}$; $r_{\text{пл}} = 50,2 \text{ кДж/кг}$.	300	10030	0,151	13,0	8,61	17,1	1,98
	400	9910	0,151	14,4	9,72	14,2	1,46
	500	9785	0,151	15,8	10,8	12,2	1,13
	600	9660	0,151	17,2	11,9	10,8	0,91
Литий Li $t_{\text{пл}} = 179^\circ\text{C}$; $t_{\text{кип}} = 1317^\circ\text{C}$; $r_{\text{пл}} = 661,5 \text{ кДж/кг}$.	200	515	4,187	37,2	17,2	111,0	6,43
	300	505	4,187	39,0	18,3	92,7	5,03
	400	495	4,187	41,9	20,3	81,7	4,04
	500	484	4,187	45,3	22,3	73,4	3,28
Сплав 56,5% Bi+43,5% Pb $t_{\text{пл}} = 123,5^\circ\text{C}$; $t_{\text{кип}} = 1670^\circ\text{C}$.	150	10550	0,146	9,8	6,39	28,9	4,50
	200	10490	0,146	10,3	6,67	24,3	3,64
	300	10360	0,146	11,4	7,50	18,7	2,50
	400	10240	0,146	12,6	8,33	15,7	1,87
	500	10120	0,146	14,0	9,44	13,6	1,44

Металл	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
Сплав 25% Na+75% K $t_{\text{пл}} = -11^\circ\text{C};$ $t_{\text{кип}} = 784^\circ\text{C}.$	100	852	1,143	23,2	23,9	60,7	2,51
	200	828	1,072	24,5	27,6	45,2	1,64
	300	808	1,038	25,8	31,0	36,6	1,18
	400	778	1,005	27,1	34,7	30,8	0,89
	500	753	0,967	28,4	39,0	26,7	0,69
	600	729	0,934	29,6	43,6	23,7	0,54
	700	704	0,900	30,9	48,8	21,4	0,44
Натрий Na $t_{\text{пл}} = 97,8^\circ\text{C};$ $t_{\text{кип}} = 883^\circ\text{C};$ $r_{\text{пл}} = 113,26 \text{кДж/кг}.$	150	916	1,356	84,9	68,3	59,4	0,87
	200	903	1,327	81,4	67,8	50,6	0,75
	300	878	1,281	70,9	63,0	39,4	0,63
	400	854	1,273	63,9	58,9	33,0	0,56
	500	829	1,273	57,0	54,2	28,9	0,53

Таблица 1.60

Физические свойства масла АМТ-300 [3]

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{кип}}, \text{кПа}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$h', \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
20	–	959	0,120	31,2	1,60	159	2030
40	–	948	0,119	64,0	1,68	44,6	596
60	–	937	0,117	96,5	1,73	16,8	233
80	–	925	0,115	134,5	1,81	8,46	123
100	–	913	0,114	170,0	1,87	5,17	77,6
120	–	901	0,112	208,2	1,94	4,44	53,8
140	0,9	889	0,111	248,0	2,01	2,47	39,7
160	1,3	879	0,108	288,0	2,08	1,77	29,8
180	1,8	863	0,106	330,0	2,14	1,31	22,9
200	2,8	849	0,104	374,0	2,22	1,09	19,9
220	4,2	835	0,102	418,0	2,28	0,914	16,5
240	6,5	822	0,100	462,0	2,34	0,775	15,0
260	10,2	808	0,099	510,0	2,42	0,663	13,1
280	15,8	794	0,095	556,0	2,48	0,569	11,8
300	24,8	781	0,093	612,0	2,53	0,507	10,8
320	30,9	767	0,091	672,0	2,62	0,465	10,1
340	66,6	753	0,088	715,0	2,68	0,406	9,3
360	90,3	740	0,086	770,0	2,73	0,359	8,5

Таблица 1.61

Физические свойства жидкого аммиака в состоянии насыщения [1]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{K}^{-1}$	Pr
-40	690,0	4,442	0,629	–	17,28	1,95
-30	677,7	4,47	0,608	0,355	18,32	1,77
-20	665,0	4,410	0,585	0,304	19,32	1,56
-10	652,0	4,549	0,563	0,264	20,25	1,38
0	638,6	4,594	0,540	0,245	21,12	1,33
10	624,7	4,646	0,518	0,234	22,54	1,31
20	610,3	4,706	0,494	0,227	23,86	1,32
30	595,2	4,777	0,472	0,222	25,66	1,335
40	579,5	4,860	0,449	0,216	33,14	1,33

Таблица 1.62

Физические свойства дифенильной смеси [4]

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ν , м ² /с	Pr
20	1060	1,591	0,137	4,11	50,0
30	1052	1,633	0,135	3,19	40,0
40	1044	1,675	0,134	2,51	33,0
50	1036	1,675	0,133	2,07	27,0
60	1028	1,717	0,131	1,73	23,0
70	1020	1,759	0,129	1,49	20,5
80	1012	1,800	0,128	1,29	18,5
90	1003	1,842	0,127	1,14	16,5
100	995	1,884	0,126	1,01	15,0
110	987	1,926	0,123	0,907	14,0
120	978	1,968	0,122	0,822	13,0
130	970	2,010	0,121	0,746	12,0
140	961	2,052	0,120	0,686	11,3
150	953	2,135	0,119	0,633	10,9
160	945	2,177	0,116	0,574	10,3
170	937	2,219	0,115	0,544	9,8
180	928	2,261	0,114	0,508	9,4
190	920	2,303	0,113	0,476	9,0
200	912	2,345	0,110	0,446	8,6
210	904	2,387	0,109	0,421	8,3

Таблица 1.63

Некоторые физические параметры жидкостей [1]

Наименование	t, °C	ρ , кг/м ³	$\alpha_T \cdot 10^5$, 1/°C	c , кДж/ (кг·°C)	λ , Вт/(м·°C)	$\mu \cdot 10$, Па·с
Азотная кислота	20	1512	–	1,720	–	–
Анилин	0	1037	85	2,020	0,186	10,2
Ацетон	0	813	–	2,114	0,174	0,395
Бензин	0	900	–	1,800	0,145	–
Бензол	0	900	124	1,670	0,15	0,76(10)*
Вода дистиллированная	4	1000	15	4,187	0,55	–
Глицерин безводный	0	1260	53	2,430	0,277	12100
Касторовое масло	0	–	–	–	0,184	2440(10)*
Ксилол	0	880	–	1,72(20)*	0,137	–
Керосин	0	850	–	2,430	0,121	–
Льняное вареное масло	15	940	–	–	–	–
Машинное масло	–	–	–	1,670	–	–
Мазут	32	–	–	–	0,118	–
Медный купорос (15% CuSO ₄ ·5H ₂ O)	15	1100	–	–	–	–
Минеральное смазочное масло	20	890–930	–	0,662	0,104	–

Наименование	t, °C	ρ , кг/м ³	$\alpha_t \cdot 10^5$, 1/°C	c, кДж/ (кг·°C)	λ , Вт/(м·°C)	$\mu \cdot 10$, Па·с
Едкий натр (66% NaOH)	15	1700	–	–	–	–
Нефтяное масло	20	890	–	2,430	0,104	–
Ртуть чистая	0	13600	–	0,138	8,14–10,5	–
Спирт бутиловый	0	810	–	–	–	5,19
Спирт изопропиловый	0	–	–	–	–	4,60
Спирт метиловый	0	810	122	2,470	0,214	0,817
Спирт этиловый	0	806	110	2,303	0,188	1,78
Серная кислота	20	1834	57	1,386	–	–
7,5%–ая H ₂ SO ₄	15	1050	–	–	0,391	–
87%–ая H ₂ SO ₄	15	1800	–	–	0,372	–
Сернистая кислота сгу- щенная	-20	1490	–	1,339	–	–
Смоляное масло	15	960	–	–	–	–
Соляная кислота	20	–	–	3,098	–	–
10%–ная HCl	15	1050	–	–	–	–
Смола	80	1200	–	–	0,139	–
Скипидар	0	–	94	1,716	0,127(15)*	–
Уксусная кислота	0	1049	–	2,135	0,177	1,24
Эфир	30	–	163	2,261	0,139	–

* Примечание: в скобках указана температура

Таблица 1.64

Зависимость физических свойств жидких металлов и сплавов от температуры [1]

Парциальное давление (упругость) пара		Плотность		Удельная теплоемкость		Динамический коэффициент вязкости		Коэффициент теплопроводности		Удельное электрическое сопротивление		Коэффициент поверхностного натяжения		Изменение объема при плавлении по отношению к объему в твердом состоянии, %
t, °C	$p \cdot 10^{-3}$, Па	t, °C	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	t, °C	c, кДж/(кг·°C)	t, °C	$\mu \cdot 10^3$, Па·с	t, °C	λ , Вт/(м·°C)	t, °C	$\rho_{\Omega} \cdot 10^8$, Ом·м	t, °C	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	
Алюминий														
1537	0,133	660	2,380	660		–	–	–	–	657	19,6	750	520	6,6
1770	1,333	700	2,369	–		–	–	–	–	670	20,5	–	–	–
2081	13,33	900	2,315	–	1,081	700	2,90	700	104	735	21,3	–	–	–
–	26,66	1100	2,261	–		800	1,40	790	122	807	22,4	–	–	–
2360	53,32	–	–	1000		–	–	–	–	870	23,2	–	–	–
Висмут														
917	0,133	300	10,03	271	0,142	304	1,66	300	17,1	300	128,9	300	376	-3,32
1067	1,333	400	9,91	400	0,148	451	1,28	400	15,5	400	134,2	350	373	–
1257	13,33	600	9,66	600	0,158	600	0,99	500	15,5	600	145,25	400	370	–
1325	26,66	802	9,40	800	0,166	–	–	600	15,5	750	153,53	450	367	–
1400	53,32	962	9,20	1000	0,175	–	–	700	15,5	–	–	500	363	-3,1
Кадмий														
394	0,133	300	0,01			350	2,37	355	44,5	325	33,7	330	564	4,74
484	1,333	350	7,99			400	2,16	358	44,0	400	33,7	370	608	–
611	13,33	400	7,93	321	0,265	500	1,84	380	44,0	500	34,12	420	598	–
658	26,66	500	7,82			600	1,54	435	50,0	600	34,82	450	611	–
711	53,32	600	7,72	700	0,267	–	–	–	–	700	35,78	500	600	–
Калий														
342	0,133	100	0,819	75	0,817	69,9	0,515	200	45,0	64	13,16	100		–
443	1,333	250	0,783	200	0,789	167,4	0,330	300	42,5	150	18,70	–		–
581	13,33	400	0,747	400	0,763	250	0,259	400	40,0	250	25,00	–	86	2,41
635	26,66	550	0,711	600	0,763	400	0,191	500	37,6	300	28,2	–		–
696	53,32	700	0,676	800	0,788	700	0,136	600	35,5	350	31,4	150		–
Литий														
745	0,133	200	0,507	200	4,187	183,4	0,593	218	–	230	45,27	–	–	1,5
890	1,333	400	0,490	600	4,187	193,2	0,574	–	–	–	–	–	–	–
1084	13,33	600	0,474	1000	4,187	208,1	0,554	–	37,7	–	–	–	–	–
1156	26,66	800	0,457	–	–	250,8	0,493	–	–	–	–	–	–	–
1236	53,32	1000	0,441	–	–	285,5	0,456	233	–	–	–	–	–	–

Парциальное давление (упругость) пара		Плотность		Удельная теплоемкость		Динамический коэффициент вязкости		Коэффициент теплопроводности		Удельное электрическое сопротивление		Коэффициент поверхностного натяжения		Изменение объема при плавлении по отношению к объему в твердом состоянии, %
t, °C	p·10 ⁻³ , Па	t, °C	ρ·10 ⁻³ , кг/м ³	t, °C	c, кДж/(кг·°C)	t, °C	μ·10 ³ , Па·с	t, °C	λ, Вт/(м·°C)	t, °C	ρЭ·10 ⁸ , Ом·м	t, °C	σ·10 ³ , Н/м	
Натрий														
440	0,133	100	0,928	100	1,385	103,7	0,685	100	86,3	100	9,65	100	206,4	2,5
548	1,333	250	0,891	200	1,339	167,6	0,504	200	82,0	200	13,18	250	199,5	–
696	13,33	400	0,854	400	1,281	250	0,381	300	76,0	250	14,90	–	–	–
752	26,66	550	0,817	600	1,254	400	0,270	400	71,7	300	16,70	–	–	–
815	53,32	700	0,780	800	1,263	700	0,182	500	67,1	350	18,44	–	–	–
Олово														
1492	0,133	409	6,834	250	0,243	240	0,192	240	33,6	231,9	47,6	300	526	2,6
1703	1,333	523	6,761	–	–	300	0,166	292	34,0	400	51,4	350	522	–
1968	13,33	574	6,729	–	–	400	0,138	417	33,1	600	56,8	400	518	–
2063	26,66	648	6,721	–	–	500	0,118	498	32,8	800	62,7	450	514	–
2169	53,32	704	6,640	1100	0,316	600	0,105	–	–	1000	68,6	500	510	–
Ртуть														
126,2	0,133	–20	13,645	0	0,1388	–20	1,86	0	8,22	50	98,4	20	465	3,6
184,0	1,333	20	13,546	100	0,1373	0	1,68	60	9,70	100	103,2	112	454	–
261,7	13,33	100	13,352	200	0,1355	20	1,55	120	11,0	200	114,2	200	436	–
290,7	26,66	200	13,115	300	0,1351	100	1,21	160	11,6	300	127,5	300	405	–
323,0	53,32	300	12,881	450	0,1362	200	1,01	220	12,7	350	135,5	394	354	–
Свинец														
987	0,133	400	10,51	327	0,163	441	2,11	390	16,3	327	94,6	550	442	3,6
1167	1,333	500	10,39	400	0,155	456	2,06	400	15,9	400	98,0	400	438	–
1417	13,33	600	10,27	500	0,155	551	1,70	500	15,5	600	107,2	450	438	–
1508	26,66	800	10,04	–	–	103	1,37	600	15,0	800	116,4	500	431	–
1611	53,32	1000	9,81	–	–	844	1,19	700	15,0	1000	125,7	–	–	–
Сплав натрия с калием, 56% (вес.) Na и 44% (вес.) K														
355	0,133	100	0,847	0	0,995	103,7	0,468	100	24,4	50	37,5	t _{пл}	–	–
458	1,333	250	0,811	200	0,910	167,5	0,361	400	26,6	100	41,0	–	–	–
603	13,33	400	0,775	400	0,878	250	0,280	–	–	150	44,0	–	120–110	2,5
659	26,66	550	0,739	600	0,877	400	0,205	–	–	200	47,0	–	–	–
721	53,32	700	0,703	800	0,889	700	0,146	–	–	–	–	250	–	–

1.3. Физические свойства газов

Таблица 1.65

Физические свойства сухого воздуха ($P=1,01 \cdot 10^5$ Па) [2,5]

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$a \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	14,6	9,23	12,7	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	15,2	10,04	13,8	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	15,7	10,80	14,9	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	12,79	16,2	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	16,7	12,43	17,4	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	18,8	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	20,0	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	21,4	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	22,9	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	24,3	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	25,7	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	26,2	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	28,6	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	30,2	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	31,9	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	33,6	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45	36,8	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80	40,3	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	30,09	43,9	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	32,49	47,5	0,681
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	51,4	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	61,0	0,677
300	0,615	1,047	4,60	29,7	48,33	71,6	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,4	55,46	81,9	0,676
400	0,524	1,068	5,21	33,0	63,09	93,1	0,678
500	0,456	1,093	5,74	36,2	79,38	115,3	0,687
600	0,404	1,114	6,22	39,1	96,89	138,3	0,699
700	0,362	1,135	6,71	41,8	115,4	163,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	44,3	134,8	188,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	46,7	155,1	216,2	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	49,0	177,1	245,9	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	51,2	199,3	276,2	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	53,5	233,7	316,5	0,724

Таблица 1.66

Физические свойства дымовых газов
($B=1,01 \cdot 10^5$ Па; $p_{CO_2} = 0,13$; $p_{H_2O} = 0,11$; $p_{N_2} = 0,76$) [2,5]

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,301	1,290	10,0	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Таблица 1.67

Молярная масса (μ) и плотность при нормальных условиях (ρ) газов [1]

Название вещества и его химическая формула	Молярная масса μ , кг/кмоль	Плотность при нормальных условиях ρ , кг/м ³
Азот (N ₂)	28,016	1,2505
Аммиак (NH ₃)	17,031	0,7714
Аргон (Ar)	39,944	1,7839
Ацетилен (C ₂ H ₂)	26,04	1,1709
Ацетон (C ₃ H ₆ O)	58,08	-2,595
Н-бутан (C ₄ H ₁₀)	58,12	2,703
Изо-бутан (C ₄ H ₁₀)	58,12	2,668
Н-бутиловый спирт (C ₄ H ₁₀ O)	74,12	3,244
Вода (H ₂ O)	18,016	0,768
Водород (H ₂)	2,0156	0,08987
Воздух (сухой)	28,96	1,2928
Н-гексан (C ₆ H ₁₄)	86,17	-3,845
Гелий (He)	4,003	0,1785
Н-гептан (C ₇ H ₁₆)	100,19	4,459
Двуокись углерода (CO ₂)	44,01	1,9768
Н-декан (C ₁₀ H ₂₂)	142,30	-6,35
Дифенил (C ₁₂ H ₁₀)	154,08	-6,89
Дифениловый эфир (C ₁₂ H ₁₀ O)	168,8	-7,54
Дихлорметан (CH ₂ Cl ₂)	84,94	-3,79
Диэтиловый эфир (C ₄ H ₁₀ O)	74,12	-3,30
Закись азота (N ₂ O)	44,016	1,978
Иодистый водород (HI)	127,93	5,789
Кислород (O ₂)	32,00	1,42895
Криптон (Kr)	83,7	3,74
Ксенон (Xe)	131,3	5,89

Название вещества и его химическая формула	Молярная масса μ , кг/кмоль	Плотность при нормаль- ных условиях ρ , кг/м ³
Метан (CH ₄)	16,04	0,7168
Метиламин (CH ₅ N)	31,06	1,388
Метиловый спирт (CH ₄ O)	32,04	1,426
Неон (Ne)	20,183	0,8999
Нитрозилхлорид (NOCl)	65,465	2,9919
Озон (O ₃)	48,00	2,22
Окись азота (NO)	30,008	1,3402
Окись углерода (CO)	28,01	1,25
Н-октан (C ₈ H ₁₈)	114,22	5,03
Н-пентан (C ₅ H ₁₂)	72,14	3,457
Изо-пентан (C ₅ H ₁₂)	72,14	-3,22
Пропан (C ₃ H ₈)	44,09	2,0037
Пропилен (C ₃ H ₆)	42,08	1,915
Селеновая кислота (H ₂ Se)	80,968	3,6643
Сернистый газ (SO ₂)	64,06	2,9263
Сернистый ангидрид (SO ₃)	80,06	-3,575
Сероводород (H ₂ S)	34,08	1,5392
Фосфористый водород (PH ₃)	34,04	1,53
Фреон 11 (CF ₃ Cl)	137,40	-6,13
Фреон-12 (CF ₂ Cl ₂)	120,92	5,51
Фреон-13 (CFCl ₃)	114,47	-5,11
Фтор (F ₂)	38,00	1,695
Фтористый кремний (SiF ₄)	104,06	4,6905
Фтористый метил (CH ₃ F)	34,03	1,545
Хлор (Cl ₂)	70,914	3,22
Хлористый водород (HCl)	36,465	1,6391
Хлористый метил (CH ₃ Cl)	50,49	2,307
Хлороформ (CHCl ₃)	119,39	5,283
Циан (C ₂ N ₂)	52,04	-2,765
Цианистая кислота (HCN)	27,026	-1,205
Этан (C ₂ H ₆)	30,07	1,356
Этиламин (C ₂ H ₇ N)	45,08	2,0141
Этилен (C ₂ H ₄)	28,05	1,2605
Этиловый спирт (C ₂ H ₆ O)	46,07	2,043
Хлористый этил (C ₂ H ₅ Cl)	64,52	-2,88

Таблица 1.68

Теплофизические свойства одноатомных газов в зависимости от температуры [1]

t, °C	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·°C)	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	Pr	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	c_p , кДж/(кг·°C)	$c_p/c_v=k$	$a \cdot 10^6$, м ² /с	ρ , кг/м ³
Аргон (Ar)								
0	16,5	21,1	0,663	11,8	0,519	1,67	17,81	1,784
100	21,2	26,9	0,661	20,6	0,519	1,67	31,11	1,305
200	25,6	32,2	0,653	31,2	0,519	1,67	47,78	1,030
300	29,9	36,9	0,640	43,4	0,519	1,67	67,78	0,850
400	33,9	41,1	0,628	56,7	0,519	1,67	90,56	0,724
500	37,9	45,2	0,619	72,0	0,519	1,67	116,67	0,627
600	39,4	48,5	0,604	87,0	0,519	1,67	144,17	0,558

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^3,$ $\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$	$\mu \cdot 10^6,$ $\text{Па}\cdot\text{с}$	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$c_p,$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$c_p/c_v=k$	$a \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
Гелий (He)								
0	143	18,7	0,684	105	5,204	1,67	153,33	0,1785
100	179	22,9	0,667	176	5,204	1,67	263,33	0,1305
200	213	27,0	0,660	270	5,204	1,67	397,22	0,1030
300	244	30,8	0,656	362	5,204	1,67	552,78	0,0850
400	276	34,3	0,648	474	5,204	1,67	730,56	0,0724
500	305	37,6	0,642	611	5,204	1,67	933,33	0,0627
600	333	40,3	0,631	723	5,204	1,67	1145,80	0,0558
Неон (Ne)								
0	46,4	29,7	0,660	33,0	1,030	1,67	50	0,900
100	57,8	36,4	0,648	55,3	1,030	1,67	85	0,659
200	68,6	42,5	0,637	81,8	1,030	1,67	128,06	0,519
300	78,5	48,2	0,633	112	1,030	1,67	177,78	0,429
400	88,0	53,4	0,625	146	1,030	1,67	234,17	0,365
500	97,2	58,4	0,619	185	1,030	1,67	297,22	0,318
600	106	63,0	0,612	224	1,030	1,67	366,67	0,281
Криптон (Kr)								
0	8,88	23,4	0,656	6,28	0,249	1,67	9,56	3,74
100	11,6	30,6	0,656	11,2	0,249	1,67	17,03	7,74
200	14,3	37,3	0,648	17,2	0,249	1,67	26,64	2,16
300	16,7	43,2	0,637	24,3	0,249	1,67	38,06	1,73
400	19,3	48,5	0,625	32,0	0,249	1,67	51,11	1,516
500	21,7	53,4	0,611	40,5	0,249	1,67	65,83	1,32
600	24,1	59,2	0,612	50,6	0,249	1,67	82,78	1,17
Ксенон (Xe)								
0	5,23	21,1	0,638	3,41	0,158	1,67	5,61	5,89
100	6,95	28,2	0,643	6,55	0,158	1,67	10,19	4,31
200	8,63	34,8	0,639	10,2	0,158	1,67	16,03	3,40
300	10,2	40,7	0,630	14,5	0,158	1,67	23,00	2,81
400	11,7	46,4	0,619	19,4	0,158	1,67	31,39	2,39
500	13,5	51,4	0,603	24,7	0,158	1,67	40,83	2,08
600	15,0	54,9	0,579	29,9	0,158	1,67	51,39	1,84
Пары ртути (Hg)								
200	7,68	45,1	0,620	–	–	–	–	–
300	9,36	55,3	0,618	–	–	–	–	–
400	11,02	65,8	0,616	18,1	0,104	1,67	28,89	3,64
500	12,7	74,5	0,613	24,1	0,104	1,67	38,33	3,16
600	14,4	85,0	0,612	31,1	0,104	1,67	48,61	2,80

Таблица 1.69

Теплофизические свойства двухатомных газов в зависимости от температуры [1]

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2,$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\mu \cdot 10^6,$ $\text{Па} \cdot \text{с}$	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$c_p,$ $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$c_p/c_v=k$	$a \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\rho,$ $\text{кг}/\text{м}^3$
Азот (N_2)								
0	24,3	16,7	0,705	13,3	1,030	1,402	19,14	1,250
100	31,5	20,7	0,678	22,5	1,034	1,400	32,22	0,916
200	38,5	24,2	0,656	33,6	1,043	1,394	50,83	0,723
300	44,9	27,7	0,652	46,4	1,060	1,385	70,83	0,597
400	50,7	30,9	0,659	60,9	1,082	1,375	92,50	0,508
500	55,8	33,9	0,672	76,9	1,106	1,364	114,17	0,442
600	60,4	36,9	0,689	94,3	1,129	1,355	136,39	0,392
700	64,2	39,6	0,710	113	1,151	1,345	158,33	0,352
800	67,2	42,3	0,734	133	1,171	1,337	181,67	0,318
900	70,1	45,0	0,762	154	1,188	1,331	203,06	0,291
1000	72,3	47,5	0,795	177	1,203	1,323	222,78	0,268
Оксид углерода (CO)								
0	23,3	16,6	0,740	13,3	1,0396	1,400	17,94	1,250
100	30,1	20,7	0,718	22,6	1,0446	1,397	31,39	0,916
200	36,5	24,4	0,708	33,8	1,0584	1,389	49,72	0,723
300	42,6	27,9	0,709	47,0	1,0802	1,379	66,11	0,596
400	48,5	31,2	0,711	61,8	1,1057	1,367	86,39	0,508
500	54,1	34,4	0,720	78,0	1,1321	1,354	108,06	0,442
600	59,7	37,4	0,727	96,0	1,1568	1,344	131,67	0,392
700	65,0	40,4	0,706	115	1,1790	1,335	157,22	0,351
800	70,1	43,2	0,739	135	1,1987	1,329	185,28	0,317
900	75,5	46,0	0,740	157	1,2158	1,321	213,33	0,291
1000	80,6	48,7	0,744	180	1,2305	1,317	244,72	0,268
Водород (H_2)								
0	172	8,36	0,688	93	14,19	1,410	135,00	0,0899
100	220	10,3	0,677	157	14,45	1,398	231,67	0,0657
200	264	12,1	0,666	233	14,50	1,396	350,00	0,0519
300	307	13,8	0,655	323	14,53	1,395	494,44	0,0428
400	348	15,4	0,644	423	14,58	1,394	655,56	0,0364
500	387	16,9	0,640	534	14,66	1,390	833,33	0,0317
600	427	18,3	0,635	656	14,78	1,387	1027,78	0,0281
700	463	19,7	0,637	785	14,93	1,381	1230,56	0,0252
800	500	21,1	0,638	924	15,11	1,375	1452,78	0,0228
900	536	22,4	0,640	1070	15,31	1,369	1675,00	0,0209
1000	571	23,7	0,644	1230	15,52	1,361	1911,11	0,0192
Кислород (O_2)								
0	24,7	19,4	0,720	13,6	0,9148	1,397	18,89	1,429
100	32,9	24,1	0,686	23,1	0,9336	1,385	33,61	1,050
200	40,7	28,5	0,674	34,6	0,9630	1,370	43,33	0,826
300	48,0	32,5	0,673	47,8	0,9948	1,353	70,56	0,682
400	55,0	36,3	0,675	62,8	1,0236	1,340	92,50	0,580
500	61,5	40,0	0,682	79,6	1,0484	1,364	116,67	0,504
600	67,5	43,5	0,689	97,6	1,0689	1,321	141,11	0,447
700	72,8	46,8	0,700	117	1,0856	1,314	168,89	0,402
800	77,7	50,2	0,710	138	1,0999	1,307	194,44	0,363
900	82,0	53,4	0,725	161	1,1120	1,304	221,39	0,333
1000	85,8	56,5	0,738	184	1,1229	1,300	250,00	0,306

Таблица 1.70

Теплофизические свойства трехатомных газов в зависимости от температуры [1]

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м ⁰ С)	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$c_p,$ кДж/(кг ⁰ С)	$c_p/c_v=k$	$a \cdot 10^6,$ м ² /с	$\rho,$ кг/м ³
Двуокись серы (SO₂)								
0	8,4	12,1	0,874	4,14	0,607	1,272	4,72	2,926
100	12,3	16,1	0,863	7,51	0,662	1,243	8,72	2,140
200	16,6	20,0	0,856	11,8	0,712	1,223	12,44	1,690
300	21,2	23,8	0,848	17,1	0,754	1,207	20,14	1,395
400	25,8	27,6	0,834	23,3	0,783	1,198	27,78	1,187
500	30,7	31,3	0,822	30,4	0,808	1,191	36,67	1,033
600	35,8	35,0	0,806	38,3	0,825	1,187	47,22	0,916
700	41,1	38,6	0,788	46,8	0,834	1,184	59,72	0,892
800	46,3	42,2	0,774	56,5	0,850	1,179	73,33	0,743
900	51,9	45,7	0,755	66,8	0,858	1,177	88,89	0,681
1000	57,6	49,2	0,740	78,3	0,867	1,175	106,11	0,626
Двуокись углерода (CO₂)								
0	14,7	14,0	0,780	7,09	0,8148	1,301	9,11	1,9767
100	22,8	18,2	0,733	12,6	0,9136	1,260	17,25	1,4470
200	30,9	22,4	0,715	19,2	0,9927	1,235	27,31	1,1430
300	39,1	26,4	0,712	27,3	1,0567	1,217	39,17	0,9440
400	47,2	30,2	0,709	36,7	1,1103	1,205	53,06	0,8020
500	54,9	34,0	0,713	47,2	1,1547	1,195	68,33	0,6980
600	62,1	37,7	0,723	58,3	1,1920	1,188	85,56	0,6180
700	68,7	41,1	0,730	71,4	1,2230	1,180	101,67	0,5550
800	75,1	44,6	0,741	85,3	1,2493	1,177	120,00	0,5020
900	80,9	48,2	0,757	100	1,2715	1,174	138,61	0,4600
1000	86,3	51,5	0,770	116	1,2900	1,171	158,06	0,4230

Таблица 1.71

Углеводороды метанового ряда C_nH_{2n+2} [1]

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м ⁰ С)	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$c_p,$ кДж/(кг ⁰ С)	$c_p/c_v=k$	$a \cdot 10^6,$ м ² /с	$\rho,$ кг/м ³
Метан (CH₄)								
0	30,7	10,39	0,734	14,5	2,1654	1,314	19,81	0,7168
100	46,5	13,24	0,698	25,1	2,4484	1,268	36,11	0,525
200	63,7	15,89	0,703	38,2	2,8068	1,225	55,00	0,414
300	82,3	18,34	0,707	53,5	3,1753	1,193	75,83	0,342
400	102	20,69	0,717	71,9	3,5295	1,171	99,44	0,291
500	122,1	22,95	0,726	90,8	3,8560	1,155	125,30	0,253
600	144,2	25,20	0,726	113,0	4,1529	1,141	155,00	0,224
Этан (C₂H₆)								
0	19	8,60	0,746	6,41	1,6471	1,202	8,58	1,342
100	31,9	11,38	0,738	11,6	2,0674	1,154	15,66	0,983
200	47,5	14,12	0,741	18,2	2,4899	1,124	24,98	0,776
300	65,4	16,79	0,736	26,2	2,8696	1,105	35,55	0,640
400	85,5	19,32	0,726	35,6	3,2138	1,095	48,61	0,545
500	107,9	21,97	0,715	46,4	3,5190	1,085	64,72	0,474
600	132,6	24,52	0,701	58,5	3,7869	1,077	83,61	0,420
Пропан (C₃H₈)								
0	15,2	7,50	0,762	3,81	1,5495	1,138	5,00	1,967
100	26,3	10,00	0,768	6,94	2,0168	1,102	9,06	1,440
200	40,1	12,45	0,763	10,9	2,4581	1,083	14,36	1,140
300	56,2	14,81	0,748	15,8	2,8345	1,070	21,14	0,939
400	74,8	17,16	0,727	21,6	3,1610	0,062	29,72	0,799
500	95,6	19,42	0,700	28,2	3,4487	1,057	40,00	0,694
600	118,6	21,77	0,678	35,6	3,6974	1,053	52,22	0,616

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м ⁰ С)	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$c_p,$ кДж/(кг ⁰ С)	$c_p/c_v=k$	$a \cdot 10^6,$ м ² /с	$\rho,$ кг/м ³
Бутан (C₄H₁₀)								
0	13,3	6,84	0,821	2,63	1,5918	1,097	3,22	2,593
100	23,5	9,26	0,798	4,87	2,0273	1,075	6,11	1,90
200	36,5	11,67	0,784	7,78	2,4556	1,061	9,92	1,50
300	51,9	14,02	0,761	11,3	2,8149	1,052	14,92	1,24
400	69,8	16,38	0,734	15,6	3,1292	1,046	21,22	1,05
500	90,2	18,73	0,706	20,5	3,4043	1,043	28,89	0,916
600	113,0	21,08	0,679	26,1	3,6442	1,040	38,06	0,812
Пентан (C₅H₁₂)								
0	12,3	6,35	0,821	–	1,5931	1,077	–	–
100	22,0	8,65	0,796	3,67	2,0247	1,060	4,61	2,355
200	34,1	10,88	0,781	5,90	2,4476	1,049	7,47	1,86
300	48,6	13,24	0,763	8,62	2,7993	1,042	11,33	1,54
400	65,5	15,49	0,735	11,8	3,1075	1,037	16,14	1,31
500	84,7	17,75	0,708	15,6	3,3771	1,035	22,11	1,14
600	106,1	20,10	0,684	19,9	3,6103	1,031	29,17	1,01
Гексан (C₆H₁₄)								
0	11,2	5,90	0,841	–	1,6023	1,063	–	–
100	20,2	8,15	0,814	2,89	2,0231	1,050	35,56	2,813
200	32,0	10,39	0,796	4,68	2,4438	1,040	58,89	2,220
300	45,9	12,65	0,769	6,92	2,7909	1,035	90,00	1,833
400	62,5	14,91	0,738	9,60	3,0936	1,031	129,45	1,560
500	81,2	17,26	0,732	12,7	3,4415	1,029	174,17	1,355
600	102,6	19,52	0,632	16,2	3,5868	1,027	238,06	1,202
Гептан (C₇H₁₆)								
0	10,7	5,39	0,812	–	1,6102	1,053	–	–
100	19,3	17,29	0,784	2,28	2,0197	1,042	29,17	3,27
200	30,5	9,62	0,771	3,72	2,4406	1,035	48,33	2,58
300	43,7	11,77	0,749	5,51	2,7849	1,030	73,89	2,13
400	59,4	13,93	0,722	7,68	3,0832	1,027	106,67	1,81
500	77,3	16,08	0,695	10,1	3,3457	1,025	146,11	1,58
600	97,7	18,34	0,670	13,0	3,5697	1,023	195,56	1,40
Октан (C₈H₁₈)								
0	9,8	4,93	0,816	–	1,6144	1,046	–	–
100	17,7	6,79	0,776	1,82	2,0209	1,037	23,50	3,73
200	27,8	8,65	0,759	2,94	2,4488	1,030	38,61	2,945
300	40,0	40,49	0,729	4,32	2,7800	1,026	59,17	2,43
400	54,3	12,36	0,700	5,96	3,0756	1,023	85,28	2,07
500	70,6	14,32	0,677	7,88	3,3360	1,022	117,50	1,80
600	89,2	16,18	0,646	10,10	3,5571	1,020	157,78	1,59

Таблица 1.72

Многоатомные газы [1]								
$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м ⁰ С)	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$c_p,$ кДж/(кг ⁰ С)	$c_p/c_v=k$	$a \cdot 10^6,$ м ² /с	$\rho,$ кг/м ³
Аммиак (NH₃)								
0	21,1	9,36	0,908	12,2	2,043	0,31	13,36	0,7714
100	34,0	13,04	0,852	23,2	2,219	1,28	27,17	0,564
200	48,8	16,67	0,818	38,0	2,399	1,26	45,83	0,445
300	65,5	20,59	0,812	56,4	2,583	1,24	68,89	0,368
400	84,0	24,32	0,796	78,7	2,747	1,22	97,50	0,313
500	103,6	28,15	0,793	105	2,918	1,20	130,56	0,272
600	124,4	31,97	0,792	134	3,082	1,19	168,33	0,241
700	147,7	35,99	0,791	168	3,245	1,18	210,56	0,217
800	171,0	39,81	0,793	205	3,404	1,17	257,5	0,196
900	196,5	44,13	0,798	247	3,555	1,16	308,33	0,179
1000	222,1	47,86	0,800	291	3,709	1,15	368,89	0,165

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м $^\circ\text{C}$)	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	Pr	$\nu \cdot 10^6,$ м 2 /с	$c_p,$ кДж/(кг $^\circ\text{C}$)	$c_p/c_v=k$	$a \cdot 10^6,$ м 2 /с	$\rho,$ кг/м 3
Аммиак (NH$_3$)								
0	21,1	9,36	0,908	12,2	2,043	0,31	13,36	0,7714
100	34,0	13,04	0,852	23,2	2,219	1,28	27,17	0,564
200	48,8	16,67	0,818	38,0	2,399	1,26	45,83	0,445
300	65,5	20,59	0,812	56,4	2,583	1,24	68,89	0,368
400	84,0	24,32	0,796	78,7	2,747	1,22	97,50	0,313
500	103,6	28,15	0,793	105	2,918	1,20	130,56	0,272
600	124,4	31,97	0,792	134	3,082	1,19	168,33	0,241
700	147,7	35,99	0,791	168	3,245	1,18	210,56	0,217
800	171,0	39,81	0,793	205	3,404	1,17	257,50	0,196
900	196,5	44,13	0,798	247	3,555	1,16	308,33	0,179
1000	222,1	47,86	0,800	291	3,709	1,15	368,89	0,165
Ацетон (C$_3$H$_6$O)								
0	9,7	6,86	0,386	–	1,256	1,130	–	–
100	17,3	9,41	0,840	5,07	1,537	1,103	6,06	1,87
200	26,9	12,06	0,806	8,22	1,788	1,086	10,22	1,47
300	38,6	14,71	0,774	12,1	2,022	1,076	15,67	1,22
400	52,1	17,36	0,743	16,9	2,236	1,067	22,64	1,03
500	67,5	20,00	0,720	22,3	2,428	1,062	30,83	0,901
600	84,7	22,75	0,695	28,3	2,587	1,059	40,83	0,799
Бензол (C$_6$H$_6$)								
0	9,2	6,98	0,716	–	0,943	1,127	–	–
100	17,3	7,21	0,554	3,74	1,325	1,086	5,11	2,55
200	28,1	12,28	0,719	5,99	1,676	1,067	8,36	2,01
300	41,6	14,64	0,688	8,80	1,956	1,057	12,83	1,66
400	57,6	17,20	0,652	12,1	2,183	1,050	18,72	1,41
500	76,4	19,76	0,614	15,9	2,369	1,047	26,22	1,23
600	96,3	22,31	0,585	20,4	2,524	1,044	35,00	1,09
Толуол (C$_7$H$_8$)								
0	13	6,609	0,748	–	1,023	1,097	–	–
100	–	8,855	–	–	1,411	1,068	–	–
200	–	11,013	–	4,65	1,750	1,059	–	2,38
300	–	13,239	–	6,75	2,047	1,045	–	1,96
400	–	15,396	–	9,23	2,294	1,040	–	1,667
500	–	17,456	–	12,0	2,504	1,036	–	1,45
600	–	19,613	–	15,3	2,671	1,034	–	1,28
Этиловый эфир (C$_4$H$_{10}$O)								
0	13	6,16	0,766	–	1,440	1,084	–	–
100	22,8	9,28	0,748	3,83	1,842	1,065	5,12	2,42
200	35,2	11,67	0,736	6,12	2,223	1,053	8,31	1,91
300	50	14,02	0,727	8,92	2,587	1,045	12,28	1,57
400	67,3	16,48	0,720	12,2	2,943	1,039	17,06	1,34
500	86,4	18,83	0,714	16,1	3,274	1,036	22,61	1,17
600	108,2	21,18	0,716	20,5	3,609	1,032	28,89	1,03

Таблица 1.73

Средние удельные теплоемкости газов (c'_m , кДж/(м³·°C)) [1]

t, °C	O ₂	N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	CH ₄	Воздух сухой	C ₂ H ₄	H ₂ S	C ₂ H ₆
0	1,306	1,294	1,298	1,277	1,599	1,495	1,733	1,549	1,298	1,825	1,507	2,211
100	1,319	1,298	1,302	1,289	1,700	1,507	1,813	1,641	1,302	2,064	1,532	2,495
200	1,336	1,298	1,306	1,298	1,788	1,524	1,888	1,758	1,306	2,282	1,562	2,776
300	1,357	1,306	1,315	1,298	1,863	1,541	1,955	1,888	1,315	2,495	1,595	3,044
400	1,377	1,315	1,327	1,302	1,930	1,566	2,018	2,014	1,327	2,688	1,633	3,308
500	1,398	1,327	1,344	1,306	1,989	1,591	2,060	2,139	1,344	2,864	1,671	3,555
600	1,415	1,340	1,357	1,310	2,043	1,616	2,114	2,261	1,357	3,027	1,780	3,776
700	1,436	1,352	1,373	1,315	2,089	1,641	2,152	2,378	1,369	3,178	1,746	3,986
800	1,449	1,365	1,386	1,319	2,098	1,666	2,181	2,504	1,382	3,308	1,784	4,174
900	1,465	1,377	1,398	1,323	2,169	1,696	2,215	2,600	1,398	3,433	1,817	4,363
1000	1,478	1,390	1,411	1,331	2,202	1,725	2,236	2,700	1,411	3,546	1,851	4,530
1100	1,491	1,403	1,424	1,336	2,236	1,750	2,261	2,788	1,424	3,655	1,884	4,685
1200	1,503	1,415	1,436	1,344	2,265	1,775	2,278	2,264	1,432	3,751	1,909	4,827
1300	1,511	1,424	1,449	1,352	2,290	1,805	2,299	2,889	1,444	–	–	–
1400	1,520	1,436	1,457	1,361	2,315	1,830	2,319	2,960	1,453	–	–	–
1500	1,528	1,444	1,465	1,369	2,336	1,855	2,340	3,044	1,470	–	–	–
1600	1,537	1,453	1,474	1,373	2,374	1,876	2,361	–	1,478	–	–	–
1700	1,545	1,461	1,482	1,382	2,374	1,901	2,382	–	1,486	–	–	–
1800	1,553	1,470	1,491	1,390	2,391	1,922	–	–	1,922	–	–	–
1900	1,562	1,474	1,499	1,398	2,407	1,943	–	–	1,499	–	–	–
2000	1,570	1,482	1,503	1,407	2,424	1,964	–	–	1,507	–	–	–
2100	1,574	1,491	1,511	1,415	2,437	1,985	–	–	1,516	–	–	–
2200	1,583	1,495	1,516	1,424	2,449	2,001	–	–	1,520	–	–	–
2300	1,591	1,503	1,520	1,432	2,462	2,018	–	–	1,524	–	–	–
2400	1,595	1,507	1,528	1,436	2,470	2,035	–	–	1,532	–	–	–
2500	1,604	1,511	1,532	1,444	2,483	2,052	–	–	1,537	–	–	–
2600	1,608	1,520	1,537	1,453	2,520	2,068	–	–	1,545	–	–	–
2700	1,616	1,528	1,545	1,461	2,533	2,085	–	–	1,553	–	–	–
2800	1,624	1,537	1,553	1,465	2,546	2,102	–	–	1,557	–	–	–
2900	1,629	1,545	1,562	1,474	2,558	2,114	–	–	1,566	–	–	–
3000	1,637	1,59	1,570	1,482	2,571	2,127	–	–	1,570	–	–	–

1.4. Физические свойства воды и водяного пара

Таблица 1.74

Физические свойства воды при атмосферном давлении и на линии насыщения [2,5]

t, °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	ρ , кг/м ³	h, кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
0	1,0133	999,9	0	4,212	0,56	13,2	1788	1,789	-0,63	756,4	13,5
10	1,0133	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	0,70	741,6	9,52
20	1,0133	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,0133	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,0133	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,0133	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,0133	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,93
70	1,0133	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,0133	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,0133	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,0133	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,4326	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,9854	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,74
130	2,7012	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,6136	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,7597	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,1804	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,9202	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,027	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,552	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,551	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,079	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,201	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,979	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,480	813,6	1037,5	4,766	62,8	16,2	114,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	39,776	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,940	784,0	1135,1	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,1	237,4	0,87
270	55,051	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,191	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,448	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,917	512,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,697	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,90	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,74	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35
370	210,53	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	264	4,709	6,79

Таблица 1.75

Физические свойства водяного пара на линии насыщения [2,5]

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho'',$ кг/м ³	$h'',$ кДж/кг	$g,$ кДж/кг	$c_p,$ кДж/ (кг ⁰ С)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/ (м ⁰ С)	$a \cdot 10^6,$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	Pr
0,01	0,0061	0,00485	2501	2500	1,861	1,697	1888	9,156	1888	1,00
10	0,0123	0,00939	2519,4	2477	1,869	1,770	1011	9,493	1011	1,00
20	0,0234	0,01729	2537,7	2453	1,877	1,824	563,7	9,746	563,7	1,00
30	0,0424	0,03037	2555,9	2430	1,885	1,883	328,9	9,989	328,9	1,00
40	0,0738	0,05117	2574	2406	1,895	1,953	200,7	10,270	200,7	1,00
50	0,1233	0,08303	2591,8	2382	1,907	2,034	128,8	10,586	127,5	0,99
60	0,1992	0,1302	2609,5	2358	1,923	2,122	84,70	10,921	83,88	0,99
70	0,3116	0,1981	2626,8	2333	1,942	2,214	57,48	11,272	56,90	0,99
80	0,4736	0,2932	2643,8	2309	1,967	2,309	40,03	11,620	39,63	0,99
90	0,7011	0,4232	2660,3	2283	1,997	2,407	28,55	11,960	28,26	0,99
100	1,013	0,598	2676,3	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,8	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,6	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,7	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734	2145,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,86	1,12
150	4,76	2,547	2746,3	2114,4	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2757,7	2082,6	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768	2049,5	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2777,1	2015,2	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,394	2784,9	1978,8	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2791,4	1940,7	3,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2796,4	1900,5	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2799,9	1857,8	3,408	3,896	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2801,7	1813,0	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2801,6	1765,6	3,881	4,291	0,658	17,76	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2799,5	1715,8	4,158	4,512	0,544	18,25	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2795,2	1661,4	4,468	4,803	0,453	18,84	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2788,3	1604,4	4,815	5,106	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2778,6	1542,9	5,234	5,489	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2765,4	1476,3	5,694	5,827	0,261	20,60	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2748,4	1404,3	6,280	6,268	0,216	21,29	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2726,8	1325,2	7,118	6,838	0,176	21,97	0,403	2,29
320	112,9	64,72	2699,6	1238,1	8,206	7,513	0,141	22,86	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2665,5	1139,7	9,880	8,257	0,108	23,94	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2622,3	1027,1	12,35	9,304	0,0811	25,21	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2566,1	893,1	16,24	10,70	0,0580	26,58	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2485,7	719,7	23,03	12,79	0,0386	29,14	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2335,7	438,4	56,52	17,10	0,0150	33,75	0,166	11,1

Таблица 1.76

Зависимость температуры кипения воды ($t_{\text{кип}}$) и теплоты парообразования (r) от давления (p) [8]

$p \cdot 10^{-5}$, Па	$t_{\text{кип}}$, °С	r , кДж/кг	$p \cdot 10^{-5}$, Па	$t_{\text{кип}}$, °С	r , кДж/кг
0,0123	10	2477,4	42	253,24	1696,7
0,0234	20	2453,8	44	256,05	1681,7
0,0424	30	2430,2	46	258,75	1667,0
0,0737	40	2406,5	48	261,37	1652,5
0,1234	50	2382,5	50	263,91	1638,2
0,1992	60	2358,4	52	266,38	1624,1
0,3116	70	2333,8	54	268,77	1610,2
0,4736	80	2308,9	56	271,10	1596,4
0,7011	90	2283,4	58	273,36	1582,8
1	99,63	2258,2	60	275,56	1569,4
2	120,23	2202,2	62	277,71	1556,0
3	133,54	2164,1	64	279,80	1542,8
4	143,62	2133,8	66	281,85	1529,6
5	151,84	2108,4	68	283,85	1516,6
6	158,84	2086,0	70	285,80	1503,7
7	164,96	2065,8	72	287,71	1490,7
8	170,42	2047,5	74	289,58	1478,1
9	175,35	2030,4	76	291,41	1465,3
10	179,88	2014,4	78	293,22	1452,6
11	184,05	1999,3	80	294,98	1440,0
12	187,95	1985,0	82	296,71	1427,5
13	191,60	1971,3	84	298,40	1414,9
14	195,04	1958,3	86	300,07	1402,5
15	198,28	1945,7	88	301,71	1390,0
16	201,36	1933,6	90	303,32	1377,6
17	204,30	1922,0	92	304,90	1365,3
18	207,10	1910,5	94	306,45	1352,9
19	209,78	1899,6	96	307,98	1340,5
20	212,37	1888,8	98	309,49	1328,1
21	214,84	1878,4	100	310,96	1315,8
22	217,24	1868,2	102	312,42	1303,5
23	219,55	1858,2	104	313,86	1291,3
24	221,77	1848,5	106	315,28	1278,8
25	223,93	1838,8	108	316,67	1266,6
26	226,03	1829,5	110	318,04	1254,2
27	228,06	1820,3	112	319,39	1241,9
28	230,04	1811,2	114	320,73	1229,4
29	231,96	1802,3	116	322,05	1217,0
30	233,83	1793,5	118	323,35	1204,6
32	237,44	1776,3	120	324,63	1192,2
34	240,88	1759,7	122	325,90	1179,7
36	244,16	1743,4	124	327,15	1167,2
38	247,31	1727,5	126	328,39	1154,7
40	250,33	1711,9	128	329,61	1142,1

Продолжение табл. 1.76

$p \cdot 10^{-5}$, Па	$t_{\text{кип}}$, °C	г, кДж/кг	$p \cdot 10^{-5}$, Па	$t_{\text{кип}}$, °C	г, кДж/кг
130	330,81	1129,4	180	356,96	781,0
132	332,00	1116,7	182	357,87	764,2
134	333,18	1104,1	184	358,78	747,1
136	334,34	1091,3	186	359,67	729,3
138	335,49	1078,5	188	360,56	710,9
140	336,63	1065,5	190	361,44	691,9
142	337,75	1052,5	192	362,31	672,1
144	338,86	1039,5	194	363,17	651,6
146	339,96	1026,4	196	364,02	630,3
148	341,04	1012,8	198	364,87	608,2
150	342,11	999,4	200	365,71	585,0
152	343,18	986,1	202	366,54	560,8
154	344,23	972,5	204	367,37	535,4
156	345,27	958,9	206	368,18	508,3
158	346,30	945,1	208	368,99	479,3
160	347,32	931,2	210	369,79	448,0
162	348,33	917,2	212	370,58	413,7
164	349,32	903,0	214	371,4	375,1
166	350,31	888,6	216	372,2	328,2
168	351,29	874,0	218	372,9	270,6
170	352,26	859,2	220	373,7	184,8
172	353,21	844,2	Критическое	Критическое	Критическое
174	354,17	828,8	состояние	состояние	состояние
176	355,11	813,3	221,29	374,15	–
178	356,04	797,3			

2. РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В ТЕЛАХ ПРОСТЕЙШЕЙ ФОРМЫ [17]

Расчет нагрева или охлаждения тел сводится к определению температурного поля, которое находят решением дифференциального уравнения теплопроводности. Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет бесчисленное множество решений. Для выделения единственного решения этого уравнения задают условия однозначности, которые включают: геометрические размеры и форму тела, время для нестационарного процесса, физические свойства вещества, начальное распределение температуры в заданной расчетной области (начальные условия) и условия теплообмена на границе этой области (граничные условия). Дифференциальное уравнение с соответствующими условиями однозначности называют краевой задачей теории теплопроводности.

На практике наиболее часто выполняют расчет температурного поля тел, так называемой простой или классической формы. Таких тел три:

— бесконечная или неограниченная пластина – пластина, у которой толщина много меньше (в несколько раз) длины и ширины, и условия теплообмена одинаковы на обеих поверхностях пластины;

— бесконечный цилиндр – цилиндр, у которого диаметр меньше (в несколько раз) длины цилиндра, и условия теплообмена одинаковы по всей поверхности цилиндра;

— шар или сфера, у которой условия теплообмена одинаковы по всей поверхности сферы.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для тел простейшей формы с постоянными физическими коэффициентами имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{k-1}{x_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_1} \right), \quad (2.1)$$

где T – температурное поле, $^{\circ}\text{C}$ или K ; τ – время нагрева или охлаждения, c ; a – коэффициент температуропроводности, m^2/c ; x_1 – первая координата в ортогональной системе координат, m ; $x_1 = x$ в декартовой системе координат, $x_1 = r$ в цилиндрической и сферической системах координат; k – коэффициент формы тела: $k = 1$ – бесконечная пластина; $k = 2$ – бесконечный цилиндр; $k = 3$ – шар.

В расчетах теплообмена применяют четыре типа граничных условий, которые называют родами. При граничных условиях I рода задают значение температуры на границе расчетной области, при граничных условиях II рода – значение плотности теплового потока на границе расчетной области, а при граничных условиях III рода – температуру внешней среды, окружающей тело, и закон теплообмена между средой и поверхностью тела. Граничные условия IV рода требуют задания температуры и значения плотности теплового потока на границе контакта двух тел. Граничные условия третьего рода являются наиболее общими и часто используемыми в практике расчетов, поэтому рассмотрим подробно решение краевой задачи теории теплопроводности при этих граничных условиях.

Аналитическая запись граничных условий III рода имеет вид

$$\pm \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x_1} \right|_w = \alpha |T_f - T_w|, \quad (2.2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$; $\left. \frac{\partial T}{\partial x_1} \right|_w$ – градиент температурного поля на поверхности тела, $^{\circ}\text{C}/\text{м}$; T_f – температура текучей среды, $^{\circ}\text{C}$ или K ; T_w – температура поверхности тела, $^{\circ}\text{C}$ или K ; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

На оси симметрии тела граничные условия записываются как

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x_1} \right|_{x_1=0} = 0. \quad (2.3)$$

Точные аналитические решения дифференциального уравнения теплопроводности для тел простейшей формы с граничными условиями I, II и III родов приведены в методических указаниях № 2085 [6].

Аналитическое решение дифференциального уравнения теплопроводности при граничных условиях III рода имеет вид

$$\Theta'''(X, Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \Lambda_2(\mu_n X) \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo). \quad (2.4)$$

Комплекс A_n и лямбда-функция Λ_2 рассчитывают по формулам

$$A_n = \frac{2 \cdot Bi}{Bi^2 + (2 - k)Bi + \mu_n^2}; \quad (2.5)$$

$$\Lambda_2(\mu_n X) = \frac{X^{\frac{2-k}{2}} J_{\frac{k-2}{2}}(\mu_n X)}{J_{\frac{k-2}{2}}(\mu_n)}. \quad (2.6)$$

В уравнениях (2.4)÷(2.6): $\Theta''' = (T_f - T)/(T_f - T_0)$ – безразмерная температура; T_0 – начальная температура тела; $X = x_1/R$ – безразмерная координата; $Fo = a \cdot t/R^2$ – критерий Фурье; $Bi = \alpha \cdot R/\lambda$ – критерий Био; R – характерный размер тела; k – коэффициент формы тела; μ_n – n -й корень характеристического уравнения ($n = 1, 2, \dots, \infty$); $J_m(u)$ – функции Бесселя 1 рода m -го порядка.

Характеристическое уравнение при граничных условиях III рода имеет вид

$$Bi \cdot J_{\frac{k-2}{2}}(\mu_n) = \mu_n \cdot J_{\frac{k}{2}}(\mu_n). \quad (2.7)$$

Значения функции Бесселя нулевого $J_0(u)$ и первого $J_1(u)$ порядков приведены в табл. 2.1. Функции Бесселя дробных порядков выражаются через тригонометрические функции

$$J_{-\frac{1}{2}}(u) = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot u}} \cos(u);$$

$$J_{\frac{1}{2}}(u) = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot u}} \sin(u);$$

$$J_{-\frac{3}{2}}(u) = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot u}} \left(-\frac{\cos(u)}{u} - \sin(u) \right);$$

$$J_{\frac{3}{2}}(u) = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot u}} \left(\frac{\sin(u)}{u} - \cos(u) \right).$$

При выполнении условия $Fo \geq 1/(3k)$ для расчета безразмерной температуры $\Theta'''(X, Fo)$ можно ограничиться первым слагаемым суммы ряда и тогда уравнение (2.1) преобразуется к виду

$$\Theta(X, Fo) = A_1 \cdot \Lambda_2(\mu_1 X) \exp(-\mu_1^2 \cdot Fo), \quad (2.8)$$

где μ_1 – первый корень характеристического уравнения (2.7).

Из анализа уравнений (2.5)÷(2.8) можно сделать вывод, что безразмерная температура зависит от четырех параметров $\Theta''' = f(k, X, Fo, Bi)$. Для удобства инженерных расчетов данную зависимость представляют в виде графиков – номограмм. Наиболее часто используют шесть графиков зависимости $\Theta''' = f(Fo, Bi)$, которые построены для теплового центра ($X=0$) и поверхности ($X=1$) трех тел простейшей формы и приведены на рис. 2.2÷2.9.

На рис. 2.1 показан общий вид номограммы расчета нестационарной теплопроводности в телах простейшей формы при граничных условиях III рода.

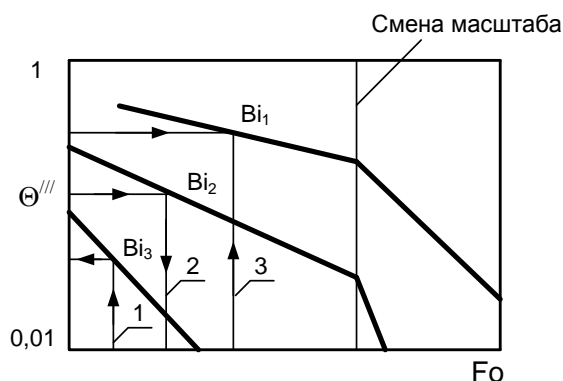


Рис. 2.1. Общий вид номограмм для расчета нестационарной теплопроводности при граничных условиях III рода:

- 1 – прямая постановка задачи $\Theta''' = f_1(Fo, Bi)$;
- 2 – обратная постановка задачи $Fo = f_2(\Theta''', Bi)$;
- 3 – обратная постановка задачи $Bi = f_3(\Theta''', Fo)$

Заметим, что при $Fo \geq 1/(3k)$ точное значение безразмерной температуры в любой точке с координатой $X=0 \div 1$ можно рассчитать по формуле (2.8), которую целесообразно переписать в следующем виде:

- для неограниченной пластины ($k = 1$)

$$\Theta'''(X, Fo) = N_n \cos(\mu_1 X) \exp[-(\mu_1)^2 Fo]; \quad (2.9)$$

$$\Theta'''(0, Fo) = N_n \cdot \exp(-(\mu_1)^2 \cdot Fo); \quad (2.10)$$

$$\Theta'''(1, Fo) = P_n \cdot \exp(-(\mu_1)^2 \cdot Fo), \quad \text{где } P_n = N_n \cdot \cos(\mu_1). \quad (2.11)$$

Значения величин $N_n, P_n, \mu_1, \mu_1^2 = f(Bi)$ приведены в табл. 2.2.

- для неограниченного цилиндра ($k = 2$)

$$\Theta'''(X, Fo) = N_{ц} \cdot J_0(\mu_1 X) \exp[-(\mu_1)^2 Fo]; \quad (2.12)$$

$$\Theta'''(0, Fo) = N_{ц} \cdot \exp(-(\mu_1)^2 \cdot Fo); \quad (2.13)$$

$$\Theta'''(1, Fo) = P_{ц} \cdot \exp(-(\mu_1)^2 \cdot Fo), \quad \text{где } P_{ц} = N_{ц} \cdot J_0(\mu_1). \quad (2.14)$$

Значения величин $N_{ц}, P_{ц}, \mu_1, \mu_1^2 = f(Bi)$ приведены в табл. 2.3, а функции Бесселя первого рода нулевого порядка в табл. 2.1.

- для шара ($k = 3$)

$$\Theta(X, Fo) = N_{ш} \cdot \frac{\sin(\mu_1 X)}{\mu_1 X} \exp\left[-(\mu_1)^2 Fo\right], \text{ для } 0 < X \leq 1; \quad (2.15)$$

$$\Theta(0, Fo) = N_{ш} \cdot \exp(-(\mu_1)^2 \cdot Fo); \quad (2.16)$$

$$\Theta(1, Fo) = P_{ш} \cdot \exp(-(\mu_1)^2 \cdot Fo), \text{ где } P_{ш} = N_{ш} \cdot \frac{\sin(\mu_1)}{\mu_1}. \quad (2.17)$$

Значения величин $N_{ш}$, $P_{ш}$, μ_1 , $\mu_1^2 = f(Bi)$ приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.1

Функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков

u	$J_0(u)$	$J_1(u)$		u	$J_0(u)$	$J_1(u)$		u	$J_0(u)$	$J_1(u)$
0,0	1,0000	0,0000		5,0	-0,1776	-0,3276		10,0	-0,2459	0,0435
0,1	0,9975	0,0499		5,1	-0,1443	-0,3371		10,1	-0,2490	0,0184
0,2	0,9900	0,0995		5,2	-0,1103	-0,3432		10,2	-0,2496	-0,0066
0,3	0,9776	0,1483		5,3	-0,0758	-0,3460		10,3	-0,2477	-0,0313
0,4	0,9604	0,1960		5,4	-0,0412	-0,3453		10,4	-0,2434	-0,0555
0,5	0,9385	0,2423		5,5	-0,0068	-0,3414		10,5	-0,2366	-0,0788
0,6	0,9120	0,2867		5,6	0,0270	-0,3343		10,6	-0,2276	-0,1012
0,7	0,8812	0,3290		5,7	0,0599	-0,3241		10,7	-0,2164	-0,1224
0,8	0,8463	0,3688		5,8	0,0917	-0,3110		10,8	-0,2032	-0,1422
0,9	0,8075	0,4059		5,9	0,1220	-0,2951		10,9	-0,1881	-0,1604
1,1	0,7196	0,4709		6,1	0,1773	-0,2559		11,1	-0,1528	-0,1913
1,0	0,7652	0,4400		6,0	0,1506	-0,2767		11,0	-0,1712	-0,1768
1,2	0,6711	0,4983		6,2	0,2017	-0,2329		11,2	-0,1330	-0,2038
1,3	0,6201	0,5220		6,3	0,2238	-0,2081		11,3	-0,1121	-0,2143
1,4	0,5669	0,5419		6,4	0,2433	-0,1816		11,4	-0,0902	-0,2224
1,5	0,5118	0,5579		6,5	0,2601	-0,1538		11,5	-0,0677	-0,2284
1,6	0,4554	0,5699		6,6	0,2740	-0,1250		11,6	-0,0446	-0,2320
1,7	0,3980	0,5778		6,7	0,2851	-0,0953		11,7	-0,0213	-0,2333
1,8	0,3400	0,5815		6,8	0,2931	-0,0652		11,8	0,0020	-0,2323
1,9	0,2818	0,5812		6,9	0,2981	-0,0349		11,9	0,0250	-0,2290
2,0	0,2239	0,5767		7,0	0,3001	-0,0047		12,0	0,0477	-0,2234
2,1	0,1666	0,5683		7,1	0,2991	0,0252		12,1	0,0697	-0,2158
2,2	0,1104	0,5560		7,2	0,2951	0,0543		12,2	0,0908	-0,2060
2,3	0,0555	0,5399		7,3	0,2882	0,0826		12,3	0,1108	-0,1943
2,4	0,0025	0,5202		7,4	0,2786	0,1096		12,4	0,1296	-0,1807
2,5	-0,0484	0,4971		7,5	0,2663	0,1352		12,5	0,1469	-0,1655

Продолжение табл. 2.1

u	$J_0(u)$	$J_1(u)$		u	$J_0(u)$	$J_1(u)$		u	$J_0(u)$	$J_1(u)$
2,6	-0,0968	0,4708		7,6	0,2516	0,1592		12,6	0,1626	-0,1487
2,7	-0,1424	0,4416		7,7	0,2346	0,1813		12,7	0,1766	-0,1307
2,8	-0,1850	0,4097		7,8	0,2154	0,2014		12,8	0,1887	-0,1114
2,9	-0,2243	0,3754		7,9	0,1944	0,2192		12,9	0,1988	-0,0912
3,0	-0,2600	0,3391		8,0	0,1716	0,2346		13,0	0,2069	-0,0703
3,1	-0,2921	0,3009		8,1	0,1475	0,2476		13,1	0,2129	-0,0488
3,2	-0,3202	0,2613		8,2	0,1220	0,2580		13,2	0,2167	-0,0271
3,3	-0,3443	0,2207		8,3	0,0960	0,2657		13,3	0,2183	-0,0052
3,4	-0,3643	0,1792		8,4	0,0692	0,2708		13,4	0,2177	0,0166
3,5	-0,3801	0,1374		8,5	0,0419	0,2731		13,5	0,2150	0,0380
3,6	-0,3918	0,0955		8,6	0,0146	0,2728		13,6	0,2101	0,0590
3,7	-0,3992	0,0538		8,7	-0,0125	0,2697		13,7	0,2032	0,0791
3,8	-0,4026	0,0128		8,8	-0,0392	0,2641		13,8	0,1943	0,0984
3,9	-0,4018	-0,0272		8,9	-0,0652	0,2559		13,9	0,1836	0,1165
4,0	-0,3971	-0,0660		9,0	-0,0903	0,2453		14,0	0,1711	0,1334
4,1	-0,3887	-0,1033		9,1	-0,1142	0,2324		14,1	0,1570	0,1488
4,2	-0,3766	-0,1386		9,2	-0,1368	0,2174		14,2	0,1414	0,1626
4,3	-0,3610	-0,1719		9,3	-0,1577	0,2004		14,3	0,1245	0,1747
4,4	-0,3423	-0,2028		9,4	-0,1768	0,1816		14,4	0,1065	0,1850
4,5	-0,3205	-0,2311		9,5	-0,1939	0,1613		14,5	0,0875	0,1934
4,6	-0,2961	-0,2666		9,6	-0,2090	0,1395		14,6	0,0679	0,1989
4,7	-0,2693	-0,2791		9,7	-0,2218	0,1116		14,7	0,0476	0,2043
4,8	-0,2404	-0,2985		9,8	-0,2323	0,0928		14,8	0,0271	0,2066
4,9	-0,2097	-0,3147		9,9	-0,2403	0,0684		14,9	0,0064	0,2069
								15,0	-0,0142	0,2051

Таблица 2.2

Коэффициенты уравнений (2.15) ÷ (2.17) для расчета температуры в характерных точках неограниченной пластины при $Fo \geq 0,3$

Bi	μ_1	μ_1^2	N_n	P_n		Bi	μ_1	μ_1^2	N_n	P_n
0,00	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000		2,2	1,1052	1,2216	1,1864	0,5326
0,01	0,0998	0,0100	1,0017	0,9967		2,4	1,1306	1,2782	1,1934	0,5086
0,02	0,1409	0,0199	1,0033	0,9934		2,6	1,1533	1,3301	1,1997	0,4864
0,04	0,1987	0,0395	1,0066	0,9868		2,8	1,1738	1,3779	1,2052	0,4660
0,06	0,2425	0,0588	1,0098	0,9802		3,0	1,1925	1,4220	1,2102	0,4470
0,08	0,2791	0,0779	1,0130	0,9738		3,5	1,2323	1,5185	1,2206	0,4054
0,10	0,3111	0,0968	1,0161	0,9673		4,0	1,2646	1,5992	1,2287	0,3704
0,12	0,3396	0,1154	1,0192	0,9610		4,5	1,2913	1,6676	1,2351	0,3407
0,14	0,3657	0,1337	1,0222	0,9546		5,0	1,3138	1,7262	1,2402	0,3152
0,16	0,3896	0,1518	1,0252	0,9484		5,5	1,3330	1,7769	1,2444	0,2931
0,18	0,4119	0,1697	1,0282	0,9422		6,0	1,3496	1,8213	1,2479	0,2738
0,20	0,4328	0,1874	1,0311	0,9360		7,0	1,3766	1,8951	1,2532	0,2418
0,22	0,4525	0,2048	1,0340	0,9299		8,0	1,3978	1,9539	1,2570	0,2164
0,24	0,4711	0,2220	1,0368	0,9238		9,0	1,4149	2,0018	1,2598	0,1956
0,26	0,4888	0,2390	1,0396	0,9178		10	1,4289	2,0417	1,2620	0,1785
0,28	0,5057	0,2557	1,0423	0,9119		12	1,4505	2,1040	1,2650	0,1518
0,30	0,5218	0,2723	1,0450	0,9060		14	1,4664	2,1504	1,2669	0,1320
0,35	0,5592	0,3127	1,0517	0,8915		16	1,4786	2,1864	1,2683	0,1167
0,40	0,5932	0,3519	1,0580	0,8773		18	1,4883	2,2150	1,2692	0,1046
0,45	0,6244	0,3899	1,0642	0,8634		20	1,4961	2,2384	1,2699	0,0947
0,50	0,6533	0,4268	1,0701	0,8498		25	1,5105	2,2815	1,2710	0,0767
0,55	0,6801	0,4625	1,0759	0,8365		30	1,5202	2,3109	1,2717	0,0644
0,6	0,7051	0,4971	1,0814	0,8235		35	1,5272	2,3323	1,2721	0,0555
0,7	0,7506	0,5633	1,0918	0,7985		40	1,5325	2,3486	1,2723	0,0487
0,8	0,7910	0,6257	1,1016	0,7745		50	1,5400	2,3716	1,2727	0,0392
0,9	0,8274	0,6846	1,1107	0,7517		60	1,5451	2,3872	1,2728	0,0328
1,0	0,8603	0,7402	1,1191	0,7299		70	1,5487	2,3984	1,2729	0,0282
1,2	0,9178	0,8424	1,1344	0,6892		80	1,5514	2,4069	1,2730	0,0247
1,4	0,9665	0,9342	1,1477	0,6520		90	1,5535	2,4135	1,2731	0,0220
1,6	1,0084	1,0169	1,1593	0,6181		100	1,5552	2,4188	1,2731	0,0198
1,8	1,0449	1,0917	1,1695	0,5871		∞	1,5708	2,4674	1,2732	0,0000
2,0	1,0769	1,1597	1,1785	0,5587						

Таблица 2.3

**Коэффициенты уравнений (2.18) ÷ (2.20) для расчета температуры
в характерных точках неограниченного цилиндра при $Fo \geq 0,17$**

Bi	μ_1	μ_1^2	$N_{\text{ц}}$	$P_{\text{ц}}$		Bi	μ_1	μ_1^2	$N_{\text{ц}}$	$P_{\text{ц}}$
0,00	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000		2,2	1,6456	2,7079	1,3578	0,5829
0,01	0,1412	0,0199	1,0025	0,9975		2,4	1,6869	2,8457	1,3754	0,5578
0,02	0,1995	0,0398	1,0050	0,9950		2,6	1,7242	2,9728	1,3914	0,5343
0,04	0,2814	0,0792	1,0099	0,9900		2,8	1,7579	3,0904	1,4059	0,5123
0,06	0,3438	0,1182	1,0148	0,9851		3,0	1,7887	3,1993	1,4191	0,4918
0,08	0,3960	0,1568	1,0197	0,9801		3,5	1,8545	3,4391	1,4473	0,4462
0,10	0,4417	0,1951	1,0246	0,9752		4,0	1,9081	3,6408	1,4698	0,4073
0,12	0,4826	0,2329	1,0294	0,9703		4,5	1,9525	3,8122	1,4880	0,3740
0,14	0,5200	0,2704	1,0342	0,9654		5,0	1,9898	3,9594	1,5029	0,3453
0,16	0,5546	0,3075	1,0389	0,9606		5,5	2,0216	4,0869	1,5151	0,3204
0,18	0,5868	0,3443	1,0436	0,9557		6,0	2,0490	4,1984	1,5253	0,2985
0,20	0,6170	0,3807	1,0483	0,9509		7,0	2,0937	4,3837	1,5411	0,2623
0,22	0,6455	0,4167	1,0529	0,9461		8,0	2,1286	4,5311	1,5526	0,2335
0,24	0,6726	0,4523	1,0576	0,9413		9,0	2,1566	4,6510	1,5611	0,2102
0,26	0,6983	0,4876	1,0621	0,9365		10	2,1795	4,7502	1,5677	0,1909
0,28	0,7229	0,5226	1,0667	0,9318		12	2,2147	4,9048	1,5769	0,1612
0,30	0,7465	0,5572	1,0712	0,9271		14	2,2404	5,0196	1,5828	0,1393
0,35	0,8014	0,6422	1,0823	0,9153		16	2,2601	5,1080	1,5869	0,1226
0,40	0,8516	0,7252	1,0931	0,9038		18	2,2756	5,1781	1,5898	0,1094
0,45	0,8978	0,8061	1,1038	0,8923		20	2,2880	5,2352	1,5919	0,0987
0,50	0,9408	0,8850	1,1143	0,8810		25	2,3108	5,3398	1,5954	0,0793
0,55	0,9809	0,9621	1,1245	0,8699		30	2,3261	5,4109	1,5973	0,0663
0,60	1,0184	1,0372	1,1345	0,8588		35	2,3372	5,4625	1,5985	0,0569
0,70	1,0873	1,1821	1,1539	0,8373		40	2,3455	5,5015	1,5993	0,0498
0,80	1,1490	1,3201	1,1724	0,8163		50	2,3572	5,5566	1,6002	0,0399
0,90	1,2048	1,4516	1,1902	0,7959		60	2,3651	5,5935	1,6007	0,0333
1,0	1,2558	1,5770	1,2071	0,7761		70	2,3707	5,6202	1,6011	0,0286
1,2	1,3456	1,8106	1,2387	0,7383		80	2,3749	5,6403	1,6013	0,0250
1,4	1,4224	2,0233	1,2673	0,7029		90	2,3782	5,6560	1,6014	0,0222
1,6	1,4892	2,2176	1,2934	0,6698		100	2,3809	5,6686	1,6015	0,0200
1,8	1,5477	2,3953	1,3170	0,6388		∞	2,4049	5,7833	1,6020	0,0000
2,0	1,5994	2,5582	1,3384	0,6099						

Таблица 2.4

**Коэффициенты уравнений (2.21)÷(2.23) для расчета температуры
в характерных точках шара при $Fo \geq 0,12$**

Bi	μ_1	μ_1^2	N_m	P_m		Bi	μ_1	μ_1^2	N_m	P_m
0,00	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000		2,2	2,0917	4,3750	1,5125	0,6272
0,01	0,1730	0,0299	1,0030	0,9980		2,4	2,1483	4,6154	1,5433	0,6019
0,02	0,2445	0,0598	1,0060	0,9960		2,6	2,1997	4,8385	1,5718	0,5779
0,04	0,3450	0,1190	1,0120	0,9920		2,8	2,2463	5,0460	1,5982	0,5552
0,06	0,4217	0,1779	1,0179	0,9880		3,0	2,2889	5,2392	1,6227	0,5338
0,08	0,4860	0,2362	1,0239	0,9840		3,5	2,3806	5,6675	1,6761	0,4855
0,10	0,5423	0,2941	1,0298	0,9801		4,0	2,4556	6,0302	1,7202	0,4437
0,12	0,5929	0,3515	1,0357	0,9761		4,5	2,5180	6,3401	1,7567	0,4074
0,14	0,6391	0,4084	1,0416	0,9721		5,0	2,5704	6,6071	1,7870	0,3758
0,16	0,6819	0,4649	1,0475	0,9682		5,5	2,6152	6,8390	1,8124	0,3482
0,18	0,7218	0,5210	1,0533	0,9642		6,0	2,6537	7,0419	1,8338	0,3240
0,20	0,7593	0,5765	1,0592	0,9603		7,0	2,7165	7,3792	1,8673	0,2835
0,22	0,7948	0,6317	1,0650	0,9563		8,0	2,7654	7,6472	1,8920	0,2514
0,24	0,8285	0,6864	1,0708	0,9524		9,0	2,8044	7,8648	1,9106	0,2254
0,26	0,8606	0,7406	1,0765	0,9485		10	2,8363	8,0446	1,9249	0,2040
0,28	0,8913	0,7945	1,0823	0,9446		12	2,8851	8,3237	1,9450	0,1710
0,30	0,9208	0,8478	1,0880	0,9407		14	2,9206	8,5299	1,9581	0,1470
0,35	0,9897	0,9794	1,1023	0,9309		16	2,9476	8,6881	1,9670	0,1287
0,40	1,0528	1,1084	1,1164	0,9213		18	2,9687	8,8132	1,9734	0,1144
0,45	1,1112	1,2347	1,1303	0,9116		20	2,9857	8,9145	1,9781	0,1029
0,50	1,1656	1,3585	1,1441	0,9021		25	3,0166	9,0996	1,9856	0,0821
0,55	1,2165	1,4798	1,1578	0,8926		30	3,0372	9,2248	1,9898	0,0682
0,60	1,2644	1,5987	1,1713	0,8832		35	3,0521	9,3151	1,9924	0,0584
0,70	1,3525	1,8293	1,1978	0,8646		40	3,0632	9,3833	1,9942	0,0510
0,80	1,4320	2,0507	1,2236	0,8462		50	3,0788	9,4793	1,9962	0,0407
0,90	1,5044	2,2633	1,2488	0,8282		60	3,0893	9,5436	1,9974	0,0338
1,0	1,5708	2,4674	1,2732	0,8106		70	3,0967	9,5898	1,9980	0,0289
1,2	1,6887	2,8516	1,3201	0,7763		80	3,1023	9,6245	1,9985	0,0253
1,4	1,7906	3,2062	1,3640	0,7435		90	3,1067	9,6516	1,9988	0,0224
1,6	1,8798	3,5335	1,4052	0,7121		100	3,1102	9,6733	1,9990	0,0202
1,8	1,9586	3,8360	1,4436	0,6823		∞	3,1416	9,8696	2,0000	0,0000
2,0	2,0288	4,1159	1,4793	0,6540						

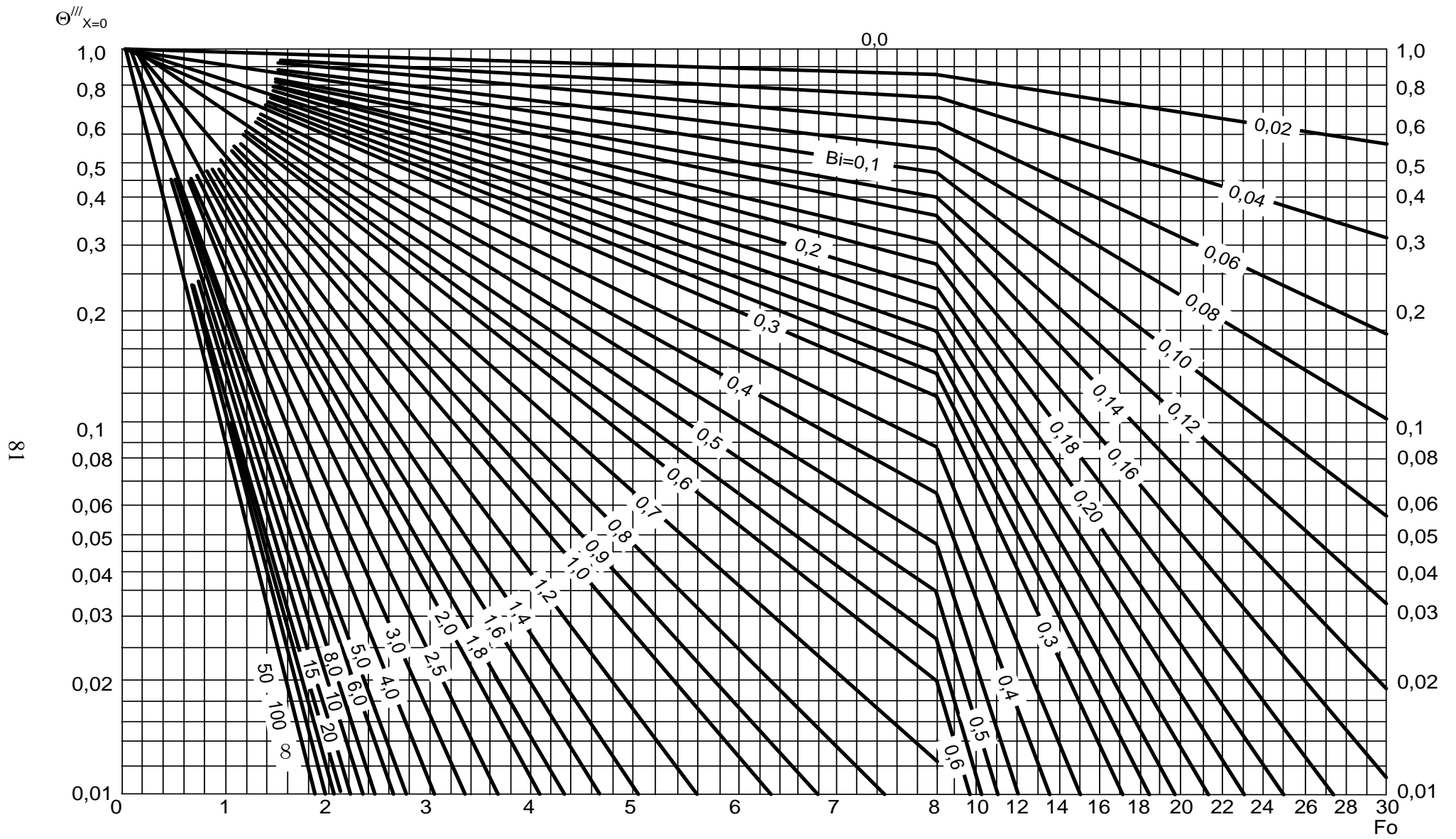


Рис. 2.2. Безразмерная температура в тепловом центре неограниченной пластины

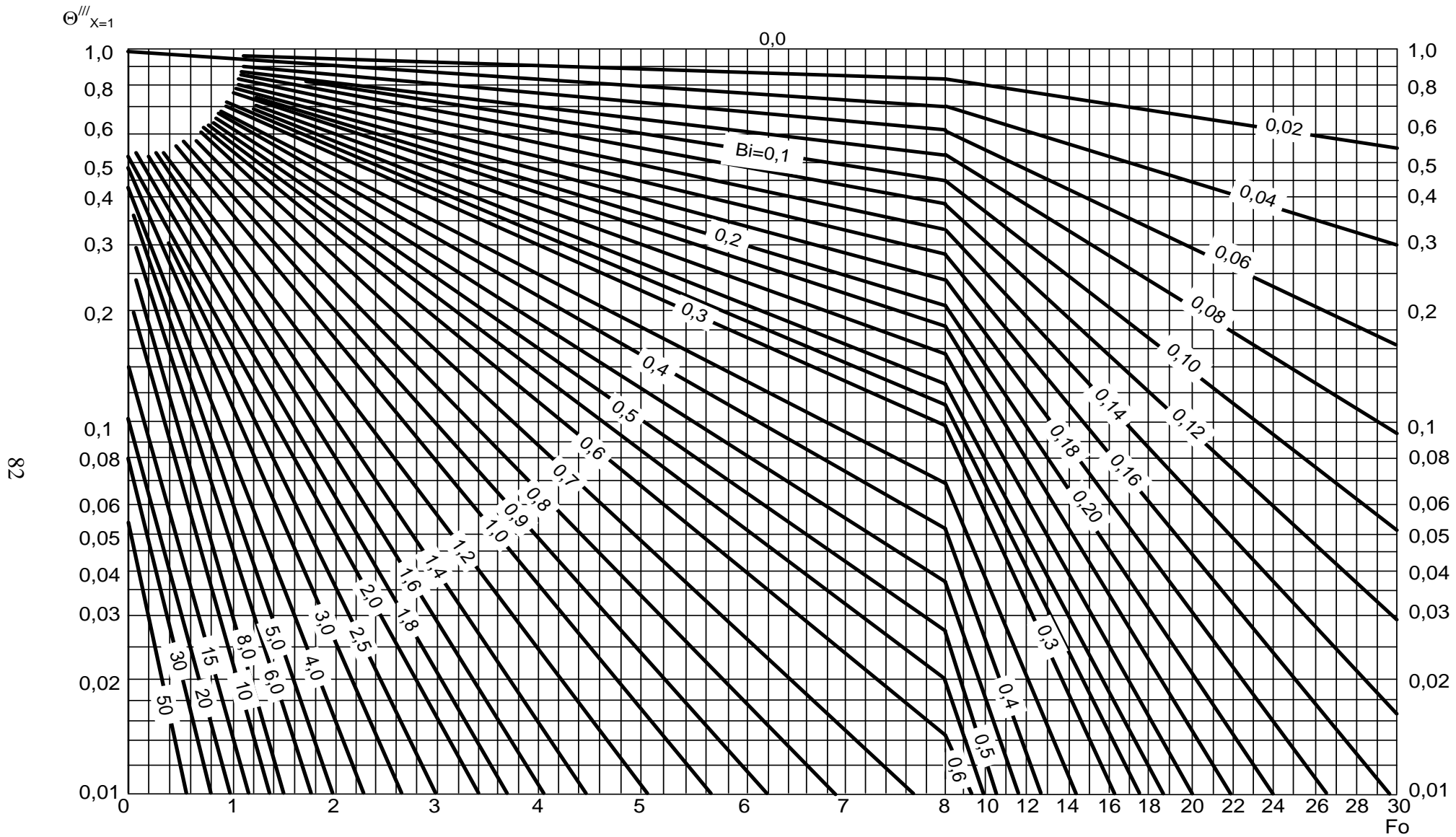


Рис. 2.3. Безразмерная температура на поверхности неограниченной пластины

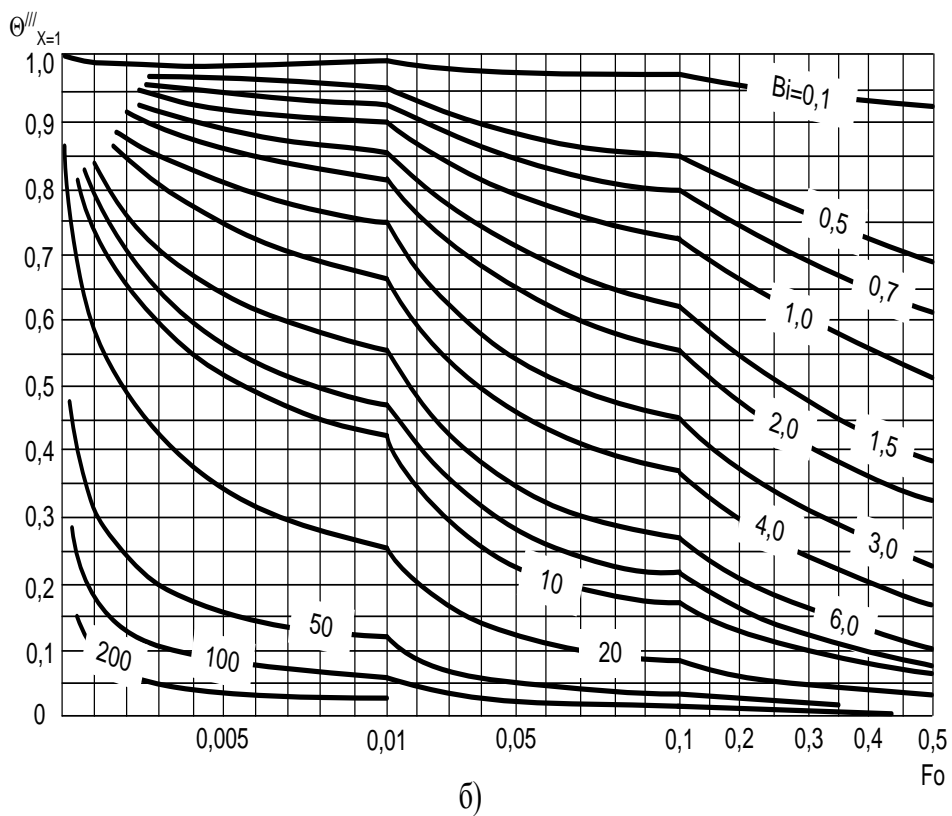
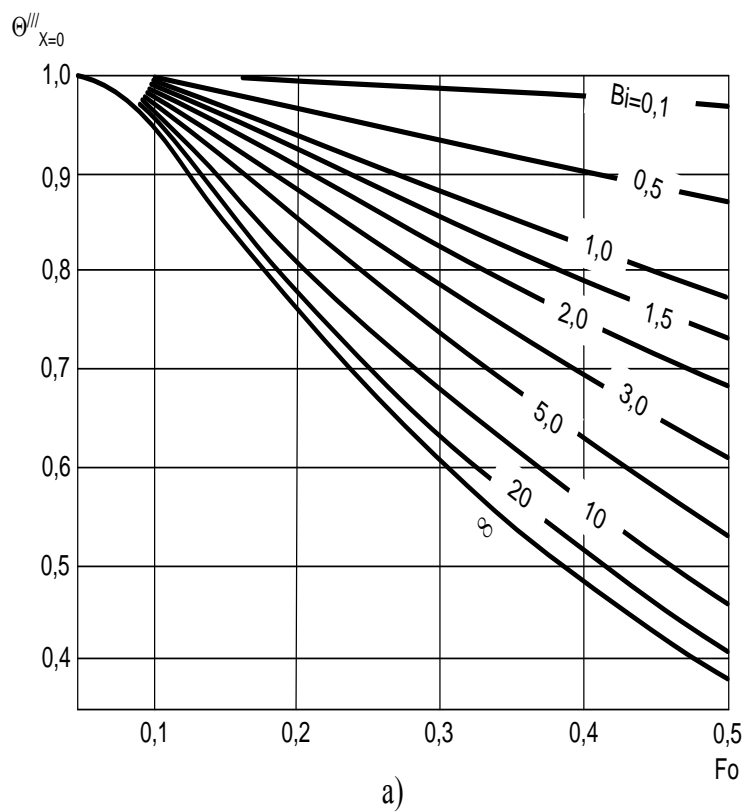


Рис. 2.4. Безразмерная температура бесконечной пластины при малых значениях Fo : а – в тепловом центре; б – на поверхности

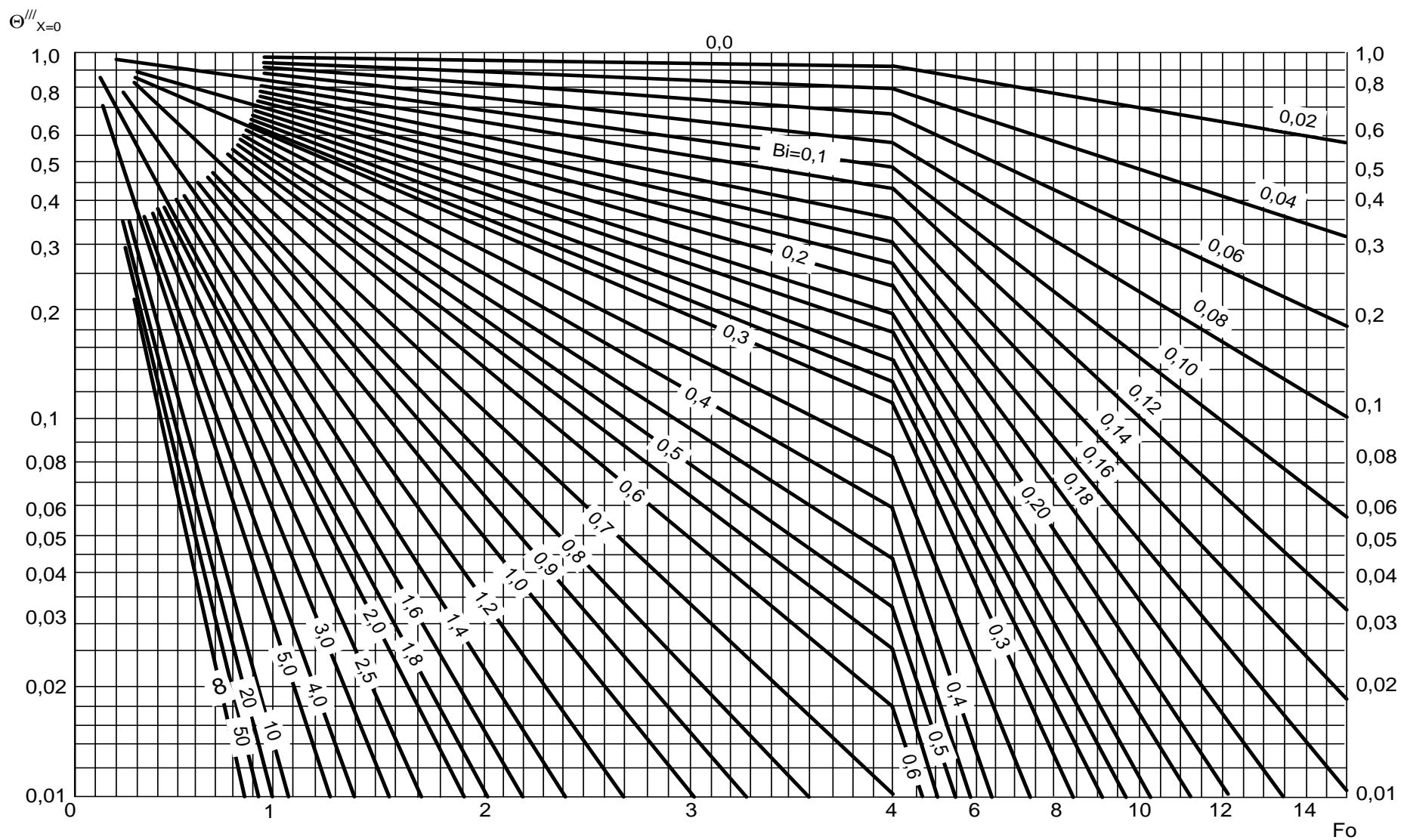


Рис. 2.5. Безразмерная температура на оси неограниченного цилиндра

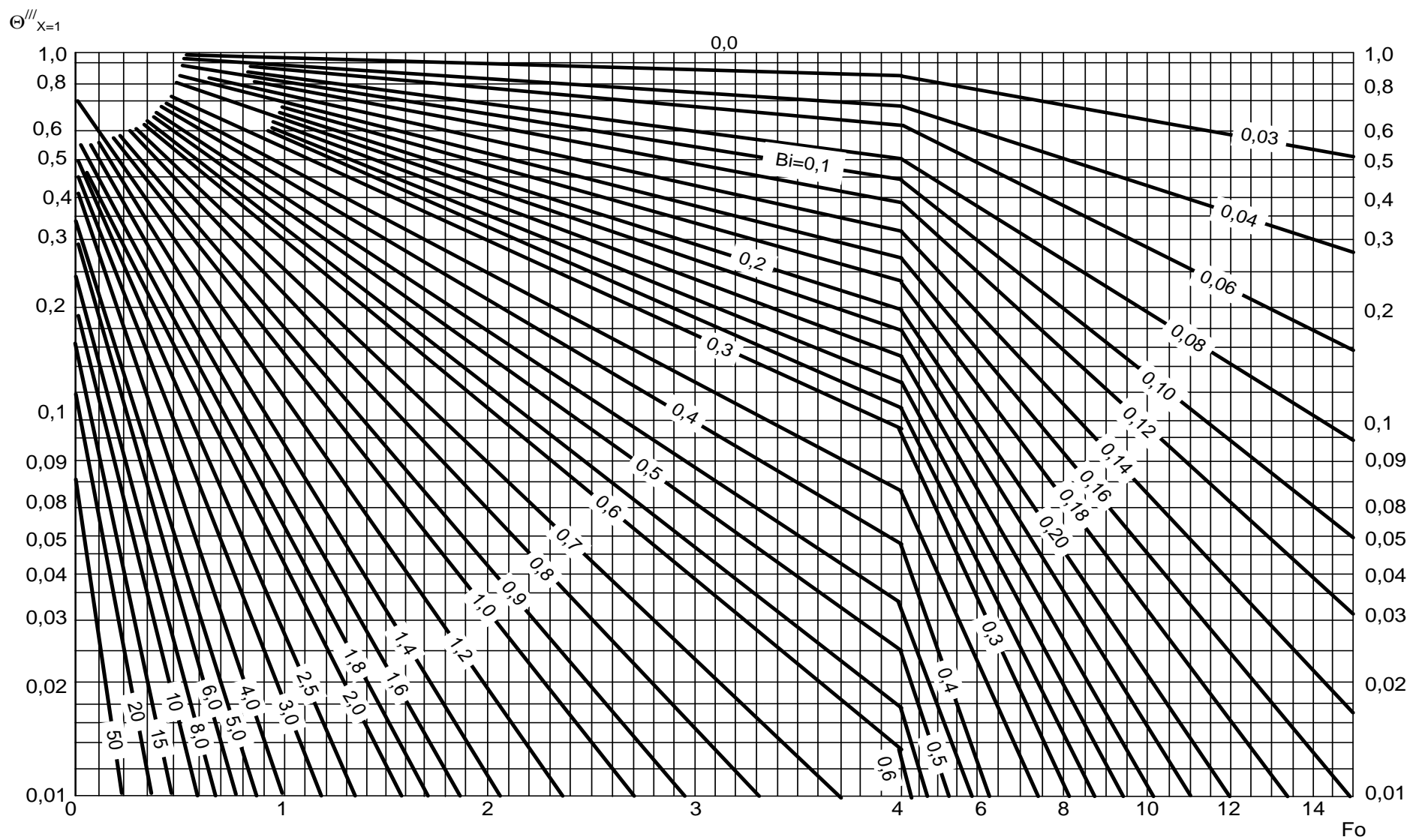
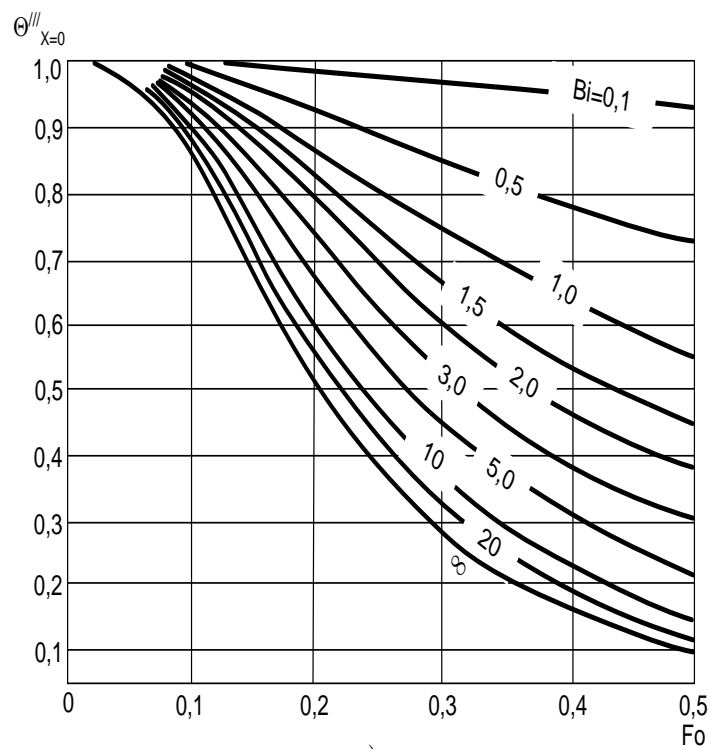
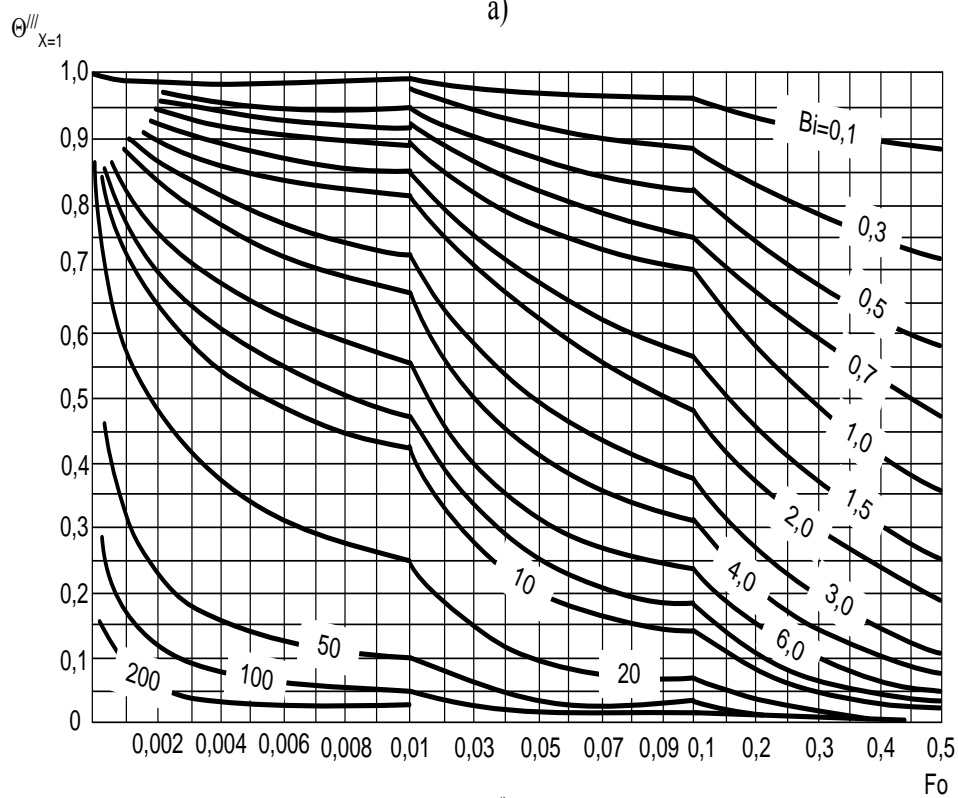


Рис. 2.6. Безразмерная температура на поверхности неограниченного цилиндра



a)



б)

Рис. 2.7. Безразмерная температура бесконечного цилиндра при малых значениях Fo: а – на оси; б – на поверхности

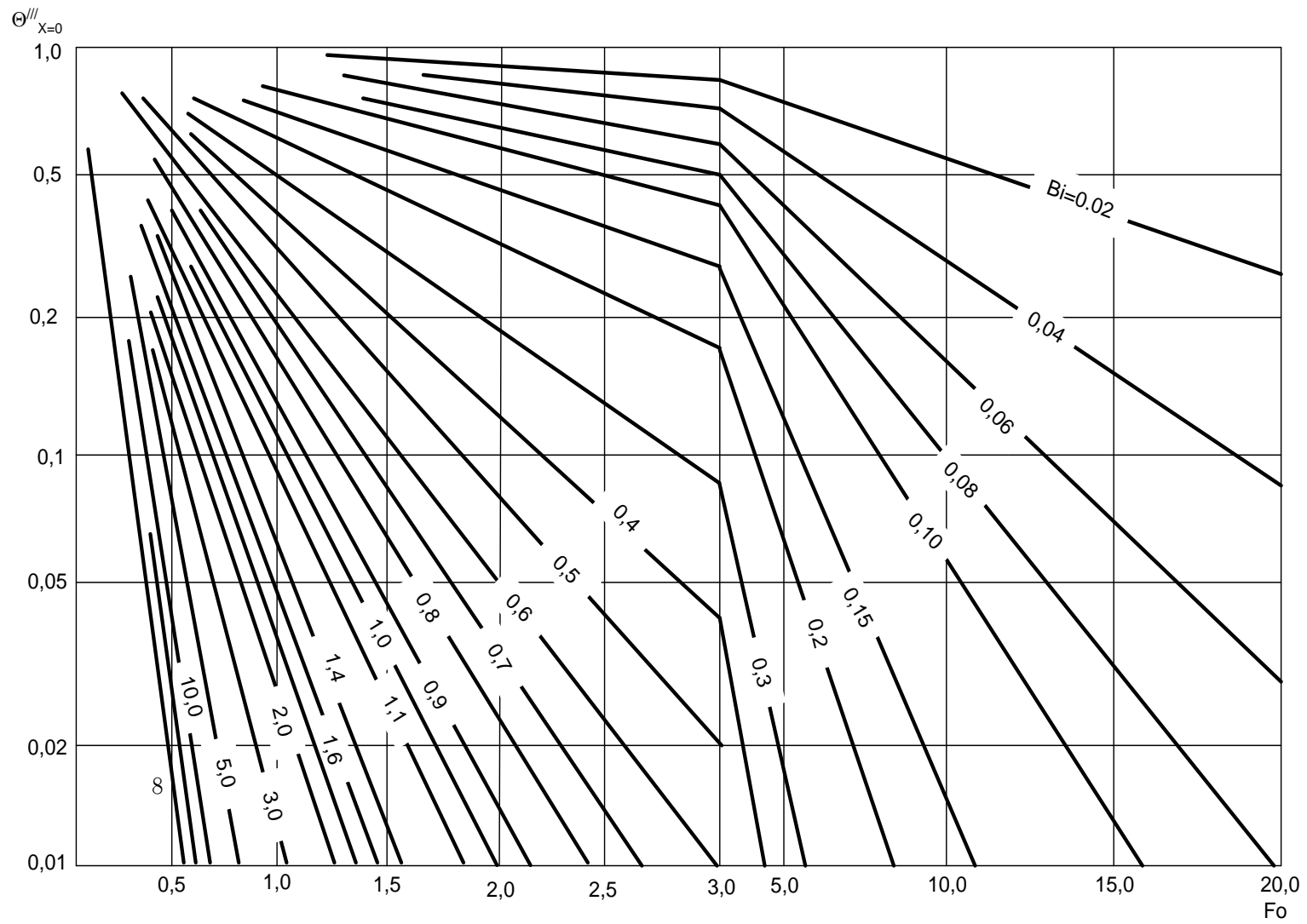


Рис. 2.8. Безразмерная температура в центре шара

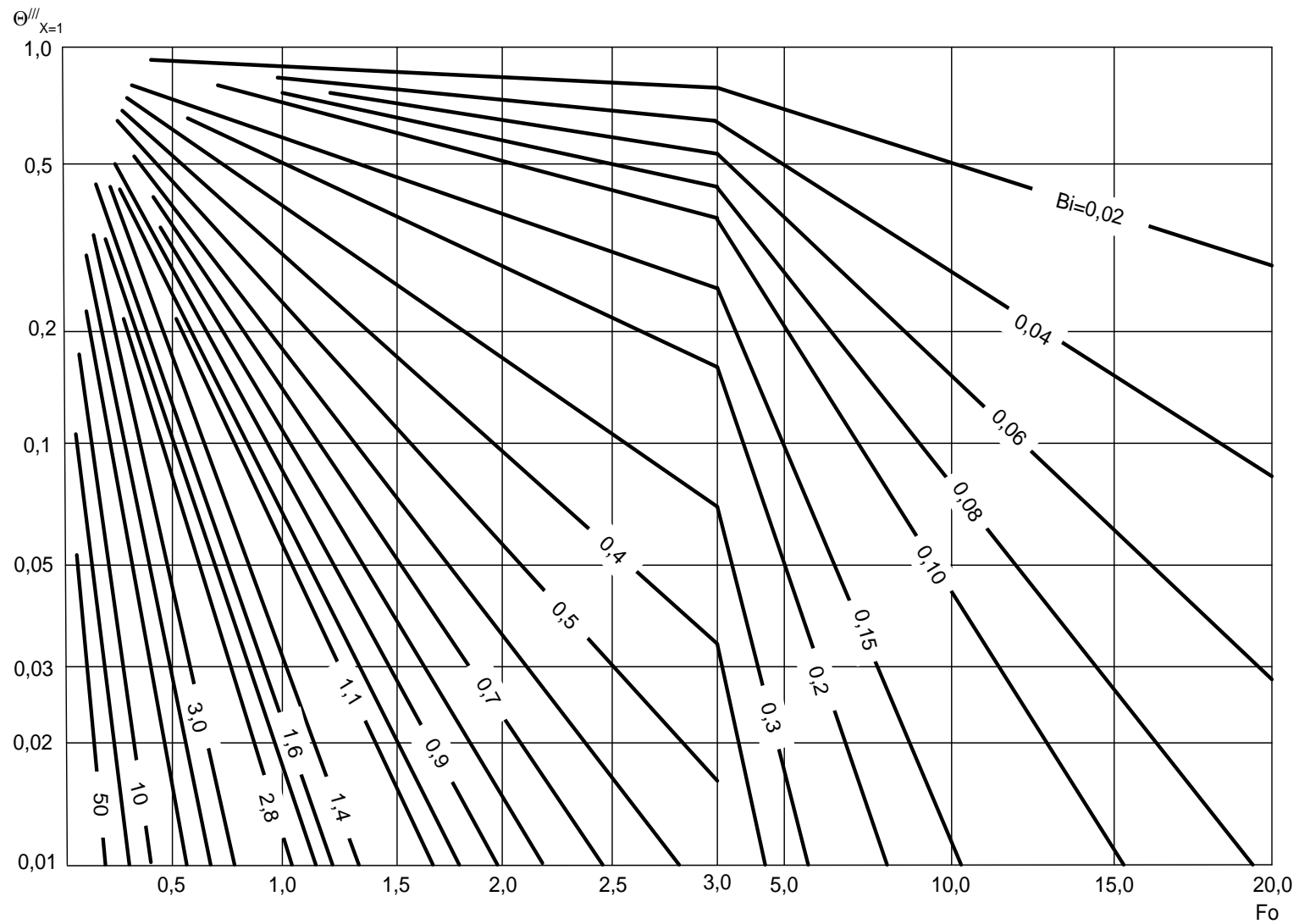


Рис. 2.9. Безразмерная температура на поверхности шара

3. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ В ОДНОФАЗНЫХ ТЕКУЧИХ СРЕДАХ [17]

3.1. Конвективная теплоотдача при свободном движении текучей среды

В этом случае безразмерный коэффициент теплоотдачи – критерий (число) Нуссельта зависит от критериев Грасгофа и Прандтля

$$Nu = f(Gr, Pr) = f(Ra), \quad (3.1)$$

где $Nu = \frac{\alpha R_0}{\lambda_f}$ – критерий Нуссельта; $Ra = GrPr$ – критерий Рэлея; $Gr = \frac{gR_0^3}{\nu^2} \beta \Delta T$ – критерий

Грасгофа; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля.

3.1.1. Теплоотдача при свободной конвекции около вертикальных пластин и вертикальных труб (формулы В.П. Исаченко [11])

Местный (локальный) и средний коэффициенты теплоотдачи при свободной конвекции около вертикальных объектов (пластин, труб и т.д.) зависят от режима течения флюида.

А. Ламинарный режим течения флюида $10^3 < Ra \leq 10^9$

При постоянной температуре теплоотдающей или тепловоспринимающей поверхности ($T_w = \text{пост}$) локальный и средний коэффициенты теплоотдачи рассчитывают по формулам

$$Nu_{f,x} = 0,55 Ra_{f,x}^{0,25} \cdot \varepsilon_t; \quad (3.2)$$

$$\overline{Nu}_{f,h} = 0,73 Ra_f^{0,25} \cdot \varepsilon_t. \quad (3.3)$$

При постоянном тепловом потоке ($Q_w = \text{пост}$), поступающем на тепловоспринимающую поверхность или уходящем с теплоотдающей поверхности локальный и средний коэффициенты теплоотдачи рассчитывают по формулам

$$Nu_{f,x} = 0,60 Ra_{f,x}^{0,25} \cdot \varepsilon_t; \quad (3.4)$$

$$\overline{Nu}_{f,h} = 0,75 Ra_f^{0,25} \cdot \varepsilon_t. \quad (3.5)$$

Температурную поправку в формулах (3.2) – (3.5) рассчитывают по формуле М.А. Михеева

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (3.6)$$

где Pr_f – критерий Прандтля флюида при температуре флюида T_f (за пределами теплового пограничного слоя); Pr_w – критерий Прандтля флюида при температуре стенки T_w .

Определяющие параметры в формулах (3.2) – (3.5):

а) $R_0 = x$ – локальная координата по высоте – для формул (3.2) и (3.4);

б) $R_0 = h$ – высота вертикальной пластины или высота вертикальной трубы – для формул (3.3) и (3.5);

в) $T_0 = T_f$ – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя).

Б. Турбулентный режим течения флюида $Ra \geq 6 \cdot 10^{10}$

При постоянной температуре ($T_w = \text{пост}$) и постоянном тепловом потоке ($Q = \text{пост}$) локальный и средний коэффициенты теплоотдачи рассчитывают по формулам

$$Nu_{f,x} = 0,15 Ra_{f,x}^{0,333} \cdot \varepsilon_t; \quad (3.7)$$

$$\overline{Nu}_f = 0,15 Ra_f^{0,333} \cdot \varepsilon_t. \quad (3.8)$$

Температурную поправку в формулах (3.7) – (3.8) рассчитывают по формуле М.А. Михеева (3.6).

Определяющие параметры в формулах (3.7) – (3.8):

- а) $R_0 = x$ – локальная координата по высоте в формуле (3.7);
- б) $R_0 = h$ – высота вертикальной пластины или высота вертикальной трубы в формуле (3.8);
- в) $T_0 = T_f$ – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя).

В. Переходный режим течения флюида $10^9 < Ra < 6 \cdot 10^{10}$

Переходный режим течения флюида наступает при числах Релея $10^9 < Ra_{f,x} < 6 \cdot 10^{10}$ и отличается неустойчивостью течения. В приближенных расчетах теплоотдачи при переходном режиме В.П. Исаченко [11] рекомендует использовать формулы (3.7) и (3.8) для турбулентного режима течения.

3.1.2. Теплоотдача при свободной конвекции около горизонтальных пластин (формулы В.П. Исаченко [11])

Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности горизонтальных пластин можно приближённо рассчитать по формулам для вертикальной поверхности (3.3), (3.5) и (3.8) с последующим введением поправок на расположение теплоотдающей поверхности [11]:

– для поверхности теплообмена обращенной вверх

$$\overline{\alpha}_{\text{гор}} = 1,3 \cdot \overline{\alpha}_{\text{расчет}}; \quad (3.9)$$

– для поверхности теплообмена обращенной вниз

$$\overline{\alpha}_{\text{гор}} = 0,7 \cdot \overline{\alpha}_{\text{расчет}}, \quad (3.10)$$

где $\alpha_{\text{расчет}}$ – коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по одной из формул (3.3), (3.5) или (3.8).

В этом случае *определяющие параметры* в формулах (3.3), (3.5) и (3.8):

- а) $R_0 = \min(a, b)$, где a и b – размеры прямоугольной пластины;
- б) $T_0 = T_f$ – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя).

3.1.3. Теплоотдача при свободном движении текучей среды при малых числах Рэлея ($Ra_{m,d} < 1$)

Теплообмен при малых числах Рэлея возникает около тонких проволок и режим течения в этом случае называют *пленочным*. Для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при пленочном режиме течения рекомендуют использовать следующие критериальные формулы:

а) по данным [12], пленочный режим течения имеет место при числах Рэлея $Ra_{m,d} = 10^{-10} \div 10^{-2}$:

$$\overline{Nu}_{m,d} = 0,675 \cdot Ra_{m,d}^{0,058}; \quad (3.11)$$

б) по данным Л.С. Эйгенсона [5], пленочный режим течения на тонких нагретых проволоках ($d = 0,2 \div 2$ мм) существует при числах Рэлея $Ra_{m,d} < 1$:

$$\overline{Nu}_{m,d} = 0,5; \quad (3.12)$$

в) по данным М.А. Михеева [5], пленочный режим существует при числах $Ra_{m,d} < 10^{-3}$ и только в этом случае можно использовать формулу (3.12). В диапазоне $Ra_{m,d} = 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$ наблюдается переходный от пленочного к ламинарному режим течения, для которого Михеев М.А. рекомендует формулу [5]:

$$\overline{Nu}_{m,d} = 1,18 \cdot Ra_{m,d}^{1/8}. \quad (3.13)$$

Определяющие параметры в формулах (3.11) – (3.13):

а) $T_0 = T_m = 0,5 \cdot (T_f + T_w)$ – средняя температура пограничного слоя;

б) $R_0 = d_n$ – наружный диаметр проволоки.

3.1.4. Теплоотдача при свободной конвекции около горизонтальных цилиндров (труб) (формула И.М. Михеевой [5])

Средний коэффициент теплоотдачи при *ламинарном* режиме течения ($Ra_{f,d} = 10^3 \div 10^8$), по данным И.М. Михеевой равен [5]:

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,5 \cdot Ra_{f,d}^{0,25} \cdot \varepsilon_t. \quad (3.14)$$

Поправку ε_t , учитывающую изменение физических свойств текучей среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (3.6).

Определяющие параметры в формуле (3.14):

а) $T_0 = T_f$ – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя);

б) $R_0 = d_n$ – наружный диаметр трубы (цилиндра).

3.1.5. Теплоотдача при свободной конвекции около вертикальных пластин, вертикальных труб, горизонтальных пластин, горизонтальных труб и шаров (формула М.А. Михеева)

По данным академика М.А. Михеева, средний коэффициент теплоотдачи при свободном движении текучей среды около тел, указанных в заголовке раздела, можно рассчитать по единой формуле

$$\overline{Nu}_m = C \cdot Ra_m^n, \quad (3.15)$$

где коэффициенты C и n в зависимости от режима течения приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значения коэффициентов C и n в формуле (3.15)

$Ra_m = Gr_m \cdot Pr_m$	Режим течения	C	n
$< 10^{-3}$	Пленочный	0,5	0
$10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$	Переходный от пленочного к ламинарному	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	Ламинарный и переходный к турбулентному	0,54	1/4
$> 2 \cdot 10^7$	Турбулентный	0,135	1/3

Определяющие параметры в формуле (3.15):

- а) $T_0 = T_m = 0,5 \cdot (T_f + T_w)$ – средняя температура пограничного слоя;
- б) $R_0 = d_n$ – наружный диаметр горизонтальных труб и шаров;
- в) $R_0 = h$ – высота вертикальной пластины или высота вертикальной трубы;
- г) $R_0 = \min(a, b)$, где a и b – размеры прямоугольной пластины. При этом в зависимости от расположения теплоотдающей (теповоспринимающей) поверхности коэффициент теплоотдачи либо увеличивают на 30%, либо уменьшают на 30% (см. формулы (3.9) и (3.10)).

3.1.6. Теплообмен при свободном движении текучей среды в ограниченном пространстве

Щелевой канал, заполненный текучей средой, в инженерных расчетах моделируют плоской стенкой, через которую теплота передается теплопроводностью и конвекцией. Учет увеличения теплового потока через щелевой канал за счет движения флюида в щели выполняют введением в расчет *эквивалентного коэффициента теплопроводности* [11]. Поэтому при свободной конвекции в узких щелях, плоских и кольцевых каналах различной формы (рис. 3.1) расчет теплового потока выполняют не по закону теплоотдачи Ньютона (3.1), а по формулам стационарной теплопроводности в плоской стенке

$$q = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\delta} (T_{w1} - T_{w2}), \quad (3.16)$$

где $\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности; δ – толщина щели или узкого канала; T_{w1} и T_{w2} – температура на стенках щелевого канала.

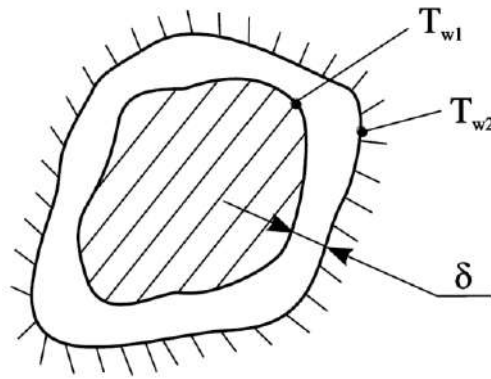


Рис. 3.1. Щелевой канал

Эквивалентный коэффициент теплопроводности рассчитывают по формуле

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_f \cdot \varepsilon_k, \quad (3.17)$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности текучей среды, который находят в справочных таблицах в зависимости от температуры; ε_k – коэффициент конвекции – поправка, учитывающая увеличение теплового потока вследствие свободной конвекции в щели [11].

Коэффициент конвекции в зависимости от критерия Рэлея определен в результате выполнения многочисленных экспериментов, выполненных по методу теории подобия:

а) при значениях $Ra_f \leq 10^3$

$$\varepsilon_k = 1; \quad (3.18)$$

б) при значениях $10^3 < Ra_f < 10^6$

$$\varepsilon_k = 0,105 \cdot Ra_f^{0,3}; \quad (3.19)$$

в) при значениях $10^6 \leq Ra_f \leq 10^{10}$

$$\varepsilon_k = 0,40 \cdot Ra_f^{0,2}. \quad (3.20)$$

Анализ формулы (3.18) показывает, что при числах Рэлея $Ra_f \leq 10^3$ теплота через текучую прослойку передается только теплопроводностью и в этом случае эквивалентный коэффициент теплопроводности равен коэффициенту теплопроводности флюида $\lambda_{\text{экв}} = \lambda_f$.

В приближенных расчетах вместо двух уравнений (3.19) и (3.20) для всей области значений аргументов $Ra_f > 10^3$ можно использовать единую зависимость [5]

$$\varepsilon_k = 0,18 \cdot Ra_f^{0,25}. \quad (3.21)$$

Определяющие параметры в формулах (3.18) – (3.21):

- а) $T_0 = T_m = 0,5 \cdot (T_f + T_w)$ – средняя температура пограничного слоя;
- б) $R_0 = d_n$ – наружный диаметр горизонтальных труб и шаров;
- в) $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{w1} + T_{w2})$ – средняя температура текучей среды в щели;
- г) $R_0 = \delta$ – ширина щели.

3.2. Конвективная теплоотдача при вынужденном движении текучей среды в трубах и каналах

В этом случае безразмерный коэффициент теплоотдачи – критерий (число) Нуссельта зависит от критерия Грасгофа (при ламинарном режиме течения), критериев Рейнольдса и Прандтля:

$$\overline{Nu} = f(Gr, Re, Pr), \quad (3.22)$$

где $Nu = \frac{\alpha R_0}{\lambda_f}$ – критерий Нуссельта; $Gr = \frac{gR_0^3}{\nu^2} \beta \Delta T$ – критерий Грасгофа; $Re = \frac{w_0 R_0}{\nu}$ – критерий Рейнольдса; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля.

3.2.1. Теплоотдача при движении флюида в прямых гладких трубах

При движении жидкостей и газов в трубах и каналах существуют ламинарный ($Re_{f,d} \leq 2300$), турбулентный ($Re_{f,d} \geq 10^4$) и переходный от ламинарного к турбулентному ($2300 < Re_{f,d} < 10^4$) режимы течения флюида.

Определяющие параметры для расчета критерия Рейнольдса при течении флюида в трубах и каналах:

- а) $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ – средняя температура флюида в трубе, где $T_{f,вх}$ и $T_{f,вых}$ – температура флюида на входе в трубу и выходе из трубы;
- б) $R_0 = d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы;
- в) $w_0 = G / (\rho f)$ – средняя по сечению трубы скорость движения флюида, где G – массовый расход теплоносителя; ρ – плотность текучей среды; f – площадь поперечного сечения трубы или канала.

А. Ламинарный режим течения флюида $Re \leq 2300$

Теплоотдача в трубах при *стабилизированном течении* и *стабилизированном теплообмене* может быть рассчитана при постоянной температуре поверхности ($T_w = \text{пост}$) и при постоянном тепловом потоке, поступающем на стенку трубы или уходящем от стенки ($Q_w = \text{пост}$) по приближенной формуле [11]

$$\overline{Nu} = 4 \cdot \varepsilon_t, \quad (3.23)$$

где температурную поправку ε_t рассчитывают по формуле (3.6).

Определяющие параметры в формуле (3.23):

- а) $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ – средняя температура флюида в трубе;
- б) $R_0 = d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы;
- в) $w_0 = G / (\rho f)$ – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

При ламинарном режиме движения в прямых гладких трубах и *наличии участков гидродинамической и тепловой стабилизации* для более точной аппроксимации экспериментальных данных выделяют два подрежима течения: ламинарный *вязкостный* и ламинарный *вязкостно-гравитационный* режимы.

Ламинарный вязкостный режим течения имеет место при числах Рэлея $Ra < 8 \cdot 10^5$, а ламинарный вязкостно-гравитационный режим при числах Рэлея $Ra \geq 8 \cdot 10^5$. При этом определяющие параметры для расчета критерия Рэлея находят по формулам:

а) $T_0 = 0,5 \cdot (T_w + \bar{T}_f)$, где $\bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$;

б) $R_0 = d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы.

Теплоотдача при ламинарном вязкостном режиме движения текучей среды в трубах ($Re \leq 2300$; $Ra < 8 \cdot 10^5$)

Средний по внутренней поверхности трубы длиной ℓ коэффициент теплоотдачи рассчитывают по формуле Б.Г.Петухова [11], которая получена при $\ell/(Re \cdot d) \leq 0,05$ и $0,07 \leq \mu_w/\mu_f \leq 1500$,

$$\bar{Nu} = 1,55 \cdot (Pe \cdot d_{вн}/\ell)^{1/3} \cdot (\mu_f/\mu_w)^{0,14} \cdot \bar{\varepsilon}_\ell, \quad (3.24)$$

где $Pe = \frac{w_0 R_0}{a}$ – критерий Пекле; μ_f – динамический коэффициент вязкости флюида при определяющей температуре T_0 ; μ_w – динамический коэффициент вязкости флюида при температуре стенки T_w .

Определяющие параметры в формуле (3.24):

а) $T_0 = 0,5 \cdot (T_w + \bar{T}_f)$, где $\bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$;

б) $R_0 = d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы;

в) $w_0 = G/(\rho f)$ – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

Поправку на начальный участок гидродинамической стабилизации ε_ℓ рассчитывают по формулам:

а) при $\ell/(Re \cdot d) < 0,1$

$$\bar{\varepsilon}_\ell = 0,6 \cdot [\ell/(Re \cdot d)]^{-1/7} \cdot [1 + 2,5 \cdot \ell/(Re \cdot d)]; \quad (3.25)$$

б) при $\ell/(Re \cdot d) \geq 0,1$

$$\bar{\varepsilon}_\ell \approx 1, \quad (3.26)$$

где ℓ – длина трубы.

Определяющие параметры в формулах (3.25) и (3.26):

а) $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ – средняя температура флюида в трубе;

б) $R_0 = d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы;

в) $w_0 = G/(\rho f)$ – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

Теплоотдача при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме движения текучей среды в трубах ($Re \leq 2300$; $Ra \geq 8 \cdot 10^5$)

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме течения может быть рассчитан по критериальному уравнению М.А. Михеева [5]

$$\bar{Nu}_{f,d} = 0,15 Re_{f,d}^{0,33} \cdot Pr_f^{0,33} \cdot (Gr_{f,d} \cdot Pr_f)^{0,1} \cdot \varepsilon_t \bar{\varepsilon}_\ell. \quad (3.27)$$

Определяющие параметры в формуле (3.27):

- а) $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ – средняя температура флюида в трубе;
- б) $R_0 = d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы;
- в) $w_0 = G/(\rho f)$ – средняя по сечению трубы скорость течения флюида.

Температурную поправку ε_t , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (3.6).

Поправочный коэффициент $\bar{\varepsilon}_\ell$, учитывающий влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, равен:

- а) при $\ell/d < 50$ значение $\bar{\varepsilon}_\ell$ находят по данным табл. 3.2;
- б) при $\ell/d \geq 50$ – $\bar{\varepsilon}_\ell = 1$.

Таблица 3.2

Значение $\bar{\varepsilon}_\ell$ при вязкостно-гравитационном режиме течения флюида

ℓ/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\bar{\varepsilon}_\ell$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

Б. Турбулентный режим течения флюида $Re \geq 10^4$

Средний коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении флюида в прямых гладких трубах рассчитывают по формуле М. А. Михеева [5]

$$\bar{Nu}_{f,d} = 0,021 \cdot Re_{f,d}^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \varepsilon_t \bar{\varepsilon}_\ell . \quad (3.28)$$

Определяющие параметры в формуле (3.28):

- а) $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ – средняя температура флюида в трубе;
- б) $R_0 = d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы;
- в) $w_0 = G/(\rho f)$ – средняя по сечению трубы скорость течения флюида.

Температурную поправку ε_t , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (3.6).

Поправочный коэффициент $\bar{\varepsilon}_\ell$, учитывающий влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, равен:

- а) при $\ell/d < 50$ – $\bar{\varepsilon}_\ell \approx 1 + 2d/\ell$;
- б) при $\ell/d > 50$ – $\bar{\varepsilon}_\ell = 1$.

Более точные значения поправки на начальный участок $\bar{\varepsilon}_\ell$ в зависимости от критерия Рейнольдса приведены в табл. 3.3.

Анализ данных табл. 3.3 показывает, что с увеличением турбулентности потока (увеличением числа Рейнольдса) влияние начального участка гидродинамической стабилизации на теплоотдачу уменьшается.

Таблица 3.3

Значение $\overline{\varepsilon_\ell}$ при турбулентном режиме течения флюида

Re	l/d							
	1	2	5	10	15	20	30	40
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02
$10 \cdot 10^4$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02
$100 \cdot 10^4$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01

В. Переходный режим течения флюида $2300 < Re < 10^4$

Переходный режим течения флюида характеризуется перемежаемостью ламинарного и турбулентного течений. В этом случае коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле [5]

$$\overline{Nu}_{f,d} = K_0 \cdot Pr_{f,d}^{0,43} \cdot \varepsilon_\ell \overline{\varepsilon_\ell}, \quad (3.29)$$

где комплекс K_0 зависит от числа Рейнольдса (см. табл. 3.4), а поправку $\overline{\varepsilon_\ell}$ рассчитывают также как и при турбулентном режиме течения флюида.

Таблица 3.4

Зависимость комплекса K_0 от числа Рейнольдса

Re · 10 ⁻³	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
K ₀	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Температурную поправку ε_ℓ рассчитывают по формуле (3.6).

Определяющие параметры в формуле (3.29):

а) $T_0 = \overline{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ – средняя температура флюида в трубе;

б) $R_0 = d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы;

в) $w_0 = G/(\rho f)$ – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

Переходный режим течения флюида в прямых гладких трубах также можно рассчитать по методике, изложенной в учебнике [13],

$$\overline{Nu} = \gamma \cdot \overline{Nu}_{турб} + (1 - \gamma) \cdot \overline{Nu}_{лам}, \quad (3.30)$$

где $\overline{Nu}_{лам}$ и $\overline{Nu}_{турб}$ числа Нуссельта, рассчитанные по формулам (3.23) и (3.28) для стабилизированного ламинарного и турбулентного режимов течения соответственно, γ – коэффициент перемежаемости равный

$$\gamma = 1 - \exp(1 - Re/2300). \quad (3.31)$$

При числах Рейнольдса $Re = 2300$ коэффициент перемежаемости равен $\gamma = 0$ и число Нуссельта $\overline{Nu} = \overline{Nu}_{\text{лам}}$. При числах Рейнольдса $Re \geq 10000$ коэффициент перемежаемости равен $\gamma \approx 1$ и число Нуссельта $\overline{Nu} = \overline{Nu}_{\text{турб}}$.

Теплоотдача при движении газов в трубах

Для газов критерий Прандтля $Pr_f \approx 0,7 \div 1,0$ и практически не зависит от температуры, поэтому температурная поправка $\varepsilon_t = (Pr_f/Pr_w)^{0,25} \approx 1$. С учетом этого формулы (3.27), (3.28) и (3.29) можно упростить и записать в виде:

а) ламинарный режим

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,146 \cdot Re_{f,d}^{0,33} \cdot Gr_{f,d}^{0,1}; \quad (3.32)$$

б) турбулентный режим

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,018 \cdot Re_{f,d}^{0,8}; \quad (3.33)$$

в) переходный режим

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,86 \cdot K_0. \quad (3.34)$$

Замечание. При больших температурных напорах и турбулентном режиме течения газов коэффициенты теплоотдачи могут отличаться от значений, вычисленных по уравнениям (3.32), (3.33) и (3.34). В этом случае расчет необходимо проводить по формулам (3.27), (3.28) и (3.29), принимая в качестве температурной поправки выражение

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\overline{T}_f}{\overline{T}_w} \right)^m, \quad (3.35)$$

где \overline{T}_f – средняя температура газа в трубе, К; \overline{T}_w – средняя температура стенки трубы, К; $m = 0,4$ если $\overline{T}_w > \overline{T}_f$ и $m = 0$, если $\overline{T}_w < \overline{T}_f$.

Определяющие параметры в формулах (3.32), (3.33) и (3.34):

а) $T_0 = \overline{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,\text{вх}} + T_{f,\text{вых}})$ – средняя температура газа в трубе;

б) $R_0 = d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы;

в) $w_0 = G/(\rho f)$ – средняя по сечению трубы скорость течения флюида.

3.2.2. Теплоотдача при движении флюида в каналах произвольного поперечного сечения

Все вышеприведенные критериальные формулы для расчета теплоотдачи в круглой трубе применимы и для расчета коэффициента теплоотдачи при течении жидкостей и газов в каналах другой (не круглой) формы поперечного сечения (прямоугольной, треугольной, кольцевой и т.д.), при продольном омывании пучков труб, заключенных в канал произвольного поперечного сечения, а также при движении жидкости, не заполняющей всего сечения канала. При этом в качестве определяющего (характерного) размера в расчетах следует применять эквивалентный (гидравлический) диаметр канала

$$R_0 = d_{\text{экв}} = d_r = 4 \frac{f}{P}, \quad (3.36)$$

где f – площадь поперечного сечения потока флюида («живое» сечение канала), m^2 ; P – смоченный периметр канала, m .

3.2.3. Теплоотдача при турбулентном движении флюида в изогнутых трубах

При движении флюида в изогнутых трубах (коленах, змеевиках) происходит дополнительная турбулизация потока и, как следствие, увеличение коэффициента теплоотдачи. При теплоотдаче в изогнутых трубах безразмерный коэффициент теплоотдачи – критерий Нуссельта рассчитывают по формуле (3.28) для турбулентного режима в прямых гладких трубах и умножают на поправочный коэффициент, учитывающий увеличение коэффициента теплоотдачи

$$\varepsilon_r = 1 + 1,8 \cdot d_{\text{вн}} / R_r, \quad (3.37)$$

где $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы; R_r – радиусгиба (изгиба) трубы.

3.3. Конвективная теплоотдача при вынужденном внешнем обтекании тел

В этом случае безразмерный коэффициент теплоотдачи – критерий (число) Нуссельта зависит от критерия Рейнольдса и критерия Прандтля

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}), \quad (3.38)$$

где $\text{Nu} = \frac{\alpha R_0}{\lambda_f}$ – критерий Нуссельта; $\text{Re} = \frac{w_0 R_0}{\nu}$ – критерий Рейнольдса; $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля.

3.3.1. Продольное обтекание пластины и внешней поверхности трубы

Экспериментально установлено, что ламинарный режим течения в пограничном слое существует при числах Рейнольдса $\text{Re} < 10^4$, турбулентный режим – при $\text{Re} > 10^6$, а переходный от ламинарного к турбулентному режим – при $\text{Re} = 10^4 \div 10^6$. Заметим, что численные значения критических чисел Рейнольдса $\text{Re}_{\text{кр},1} = 10^4$ и $\text{Re}_{\text{кр},2} = 10^6$ весьма условные величины, поскольку зависят от структуры набегающего потока и состояния поверхности пластины. В инженерных расчетах конвективной теплоотдачи переходный режим течения не рассматривают и принимают допущение о том, что ламинарный режим течения сменяется турбулентным течением при критерии Рейнольдса $\text{Re}_{\text{кр}} = 5 \cdot 10^5$.

А. Ламинарный режим течения флюида $\text{Re} < 5 \cdot 10^5$

Местный (локальный) и средний по поверхности коэффициенты теплоотдачи при ламинарном течении флюида вдоль пластины или внешней поверхности трубы по данным [12] и [14] равны:

а) при $T_w = \text{пост}$

$$\text{Nu}_x = 0,332 \cdot \text{Re}_x^{0,5} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot (\text{Pr}_f / \text{Pr}_w)^{0,25}; \quad (3.39)$$

$$\overline{\text{Nu}} = 0,664 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot (\text{Pr}_f / \text{Pr}_w)^{0,25}; \quad (3.40)$$

б) при $Q_w = \text{пост}$

$$\text{Nu}_x = 0,46 \cdot \text{Re}_x^{0,5} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot (\text{Pr}_f / \text{Pr}_w)^{0,25}; \quad (3.41)$$

$$\overline{\text{Nu}} = 0,69 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot (\text{Pr}_f / \text{Pr}_w)^{0,25}. \quad (3.42)$$

Б. Турбулентный режим течения флюида $Re \geq 5 \cdot 10^5$

Местный (локальный) и средний коэффициенты теплоотдачи при *турбулентном течении* флюида вдоль пластины или внешней поверхности трубы рассчитывают по формулам [11]

$$Nu_x = 0,0296 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr_f / Pr_w)^{0,25}; \quad (3.43)$$

$$\overline{Nu} = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr_f / Pr_w)^{0,25}. \quad (3.44)$$

Определяющие параметры в формулах (3.39) – (3.44):

- а) $T_0 = T_f$ – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя);
- б) $R_0 = x$ – продольная координата в формулах (3.39), (3.41) и (3.43);
- в) $R_0 = \ell$ – длина пластины или трубы в формулах (3.40), (3.42) и (3.44);
- г) w_0 – скорость невозмущенного потока (скорость за пределами гидродинамического пограничного слоя).

В. Расчет толщины гидродинамического пограничного слоя

Толщина гидродинамического пограничного слоя на расстоянии x от передней кромки пластины при течении жидкости или газа с постоянными физическими свойствами вдоль пластины или вдоль внешней поверхности трубы равна [11]:

- а) при $Re_x \leq 5 \cdot 10^5$

$$\delta / x = 4,64 / Re_x^{0,5}; \quad (3.45)$$

- б) при $Re_x > 5 \cdot 10^5$

$$\delta / x = 0,376 / Re_x^{0,2}. \quad (3.46)$$

Определяющие параметры в формулах (3.45), (3.46):

- а) $T_0 = T_f$ – температура текучей среды вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя);
- б) $R_0 = x$ – продольная координата;
- в) w_0 – скорость невозмущенного потока (скорость за пределами гидродинамического пограничного слоя).

3.3.2. Теплоотдача при поперечном обтекании одиночной трубы

Средний по поверхности трубы (цилиндра) коэффициент теплоотдачи по данным [15] равен:

- а) при $1 < Re < 40$

$$\overline{Nu} = 0,76 \cdot Re^{0,4} Pr^{0,37} \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (3.47)$$

- б) $40 \leq Re < 10^3$

$$\overline{Nu} = 0,52 \cdot Re^{0,5} Pr^{0,37} \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (3.48)$$

- в) $10^3 \leq Re < 2 \cdot 10^5$

$$\overline{Nu} = 0,26 \cdot Re^{0,6} Pr^{0,37} \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi; \quad (3.49)$$

$$r) 2 \cdot 10^5 \leq Re < 10^7$$

$$\overline{Nu} = 0,023 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,4} \varepsilon_t \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_\varphi. \quad (3.50)$$

Определяющие параметры в формулах (3.47) – (3.50):

- а) $T_0 = T_f$ – температура текучей среды вдали от поверхности трубы (за пределами теплового пограничного слоя);
- б) $R_0 = d_n$ – наружный диаметр трубы;
- в) $w_0 = w_{max} = G / (\rho \cdot f_{min})$ – максимальная скорость потока в самом узком поперечном сечении канала в ограниченном потоке (рис. 3.2,а) или скорость набегания неограниченного потока (рис. 3.2,б).

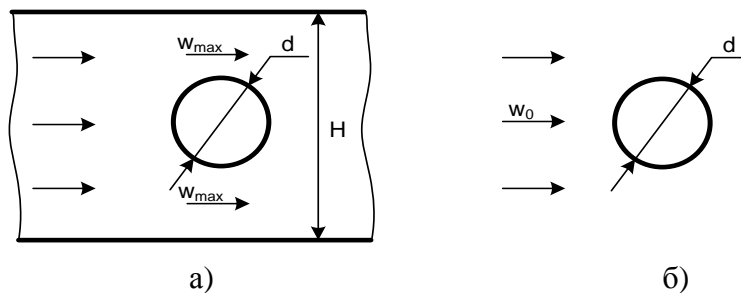


Рис. 3.2. Поперечное обтекание одиночной трубы:
а – в ограниченном потоке; б – в неограниченном потоке

Температурную поправку ε_t , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (3.6).

Поправку ε_q , учитывающую сужение потока в самом узком сечении канала (рис. 3.2), рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_q = \left[1 - \left(\frac{d_n}{H} \right)^2 \right]^{0,8}, \quad (3.51)$$

где d_n – наружный диаметр трубы (цилиндра); H – поперечный размер канала.

Поправку ε_φ , учитывающую влияние угла атаки φ набегающего потока (угол атаки φ – угол между вектором скорости и осью трубы) на коэффициент теплоотдачи, принимают по данным табл. 3.5, приведенной в задачнике [2].

Таблица 3.5

Поправка на угол атаки набегающего потока

φ°	90	80	70	60	50	40	30
ε_φ	1,0	1,0	0,99	0,93	0,87	0,76	0,66

Для приближенного расчета ε_φ предложены формулы, аппроксимирующие экспериментальные данные:

а) по данным [12]

$$\varepsilon_\varphi = 1 - 0,54 \cos^2 \varphi; \quad (3.52)$$

б) по данным [15]

$$\varepsilon_{\varphi} = \sqrt{\sin \varphi}. \quad (3.53)$$

3.3.3. Теплоотдача при поперечном обтекании трубного пучка

Для увеличения поверхности теплообмена трубы собирают в пучки. Расположение труб в пучке относительно друг друга может быть в общем случае произвольным, однако в технике чаще всего применяют два типа пучков труб – коридорное (рис. 3.3, а) и шахматное (рис. 3.3, б). Пучок труб можно охарактеризовать следующими параметрами:

- а) поперечный шаг S_1 – расстояние между осями соседних рядов труб поперек (перпендикулярно) потоку теплоносителя;
- б) продольный шаг S_2 – расстояние между осями соседних рядов труб вдоль потока теплоносителя;
- в) число рядов труб поперек потока – n_1 ;
- г) число рядов труб вдоль потока – n_2 ;
- д) форма и размеры труб, которые в общем случае могут быть круглыми, овальными, треугольными, квадратными и т.д. Для труб круглого сечения задают наружный диаметр труб – d_n .

Соседние трубы в пучке оказывают влияние на гидродинамику и теплообмен друг друга, поэтому конвективная теплоотдача в пучках труб отличается от теплоотдачи около одиночной трубы.

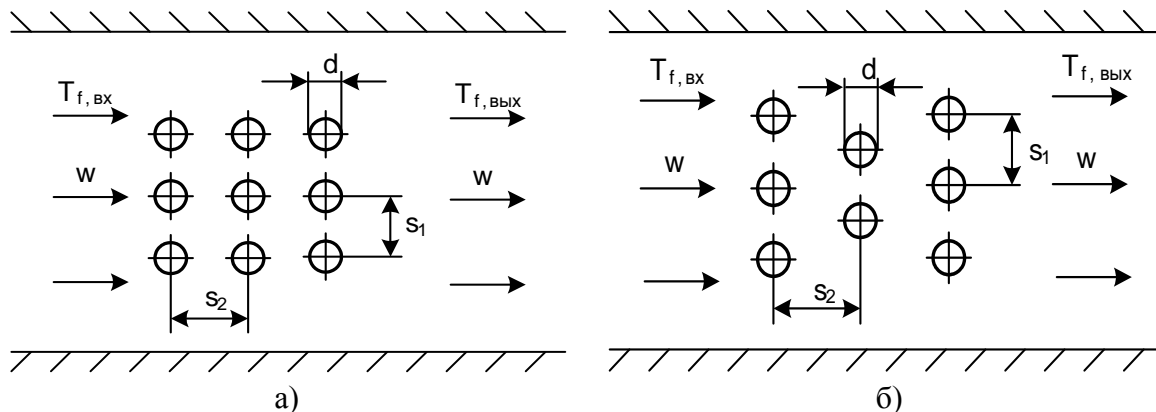


Рис. 3.3. Геометрические параметры шахматного (а) и коридорного (б) пучков

Режим течения флюида в пучках труб зависит от уровня турбулентности набегающего потока и критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{w_0 R_0}{\nu} = \frac{w_{\max} d_n}{\nu}, \quad (3.54)$$

где $w_0 = w_{\max}$ – максимальная скорость в самом узком сечении пучка; $R_0 = d_n$ – определяющий размер, равный наружному диаметру трубы (цилиндра); ν – кинематический коэффициент вязкости флюида при определяющей температуре $T_0 = \bar{T}_f$, равной средней температуре флюида в пучке.

В зависимости от критерия Рейнольдса при поперечном омывании пучков труб различают:

- а) при $Re \leq 10^3$ – ламинарный режим течения;
- б) при $Re \geq 2 \cdot 10^5$ – турбулентный режим течения;

в) при $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$ – *смешанный* режим течения – режим, при котором передняя (лобовая) часть трубы омывается ламинарным пограничным слоем, а задняя (кормовая) часть трубы омывается турбулентным потоком.

Смешанный режим омывания пучков труб наиболее часто встречается в технических устройствах, поэтому для смешанного режима течения ниже приведено критериальное уравнение расчета коэффициента теплоотдачи.

Средний коэффициент теплоотдачи α_3 для третьего ряда пучка труб и всех последующих рядов труб в пучке по направлению движения флюида при $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$ по данным [2] равен

$$\overline{Nu}_3 = C \cdot Re^n \cdot Pr^{1/3} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_\varphi \cdot \varepsilon_s, \quad (3.55)$$

где $C = 0,26$ и $n = 0,65$ – при коридорном расположении труб в пучке (рис. 3.3, а); $C = 0,41$ и $n = 0,60$ – при шахматном расположении труб в пучке (рис. 3.3, б).

Определяющие параметры в формуле (3.55):

а) $T_0 = \overline{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ – средняя температура флюида в пучке;

б) $R_0 = d_n$ – наружный диаметр трубы;

в) $w_0 = w_{max} = G / (\rho \cdot f_{min})$ – максимальная скорость потока в самом узком поперечном сечении пучка.

Температурную поправку ε_t , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (3.6).

Поправку ε_φ , учитывающую влияние угла атаки φ набегающего потока (угол атаки φ – угол между вектором скорости и осью трубы) на коэффициент теплоотдачи, рассчитывают по формуле (3.52) или по формуле (3.53). Более точные значения поправки ε_φ для пучка труб в зависимости от угла атаки φ приведены в табл. 3.6, приведенной в задачнике [2].

Таблица 3.6

Поправка на угол атаки набегающего потока в трубном пучке

φ°	90	80	70	60	50	40	30	20	10
ε_φ	1,0	1,0	0,98	0,94	0,88	0,78	0,67	0,52	0,42

Поправку ε_s , учитывающую взаимное расположение труб в пучке, рассчитывают по формулам:

а) для глубинных рядов труб коридорного пучка

$$\varepsilon_s = (d_n / S_2)^{0,15}; \quad (3.56)$$

б) для глубинных рядов труб шахматного пучка

– при $S_1 / S_2 < 2$

$$\varepsilon_s = (S_1 / S_2)^{1/6}; \quad (3.57)$$

– при $S_1 / S_2 \geq 2$

$$\varepsilon_s = 1,12, \quad (3.58)$$

где S_1 – поперечный шаг труб в пучке; S_2 – продольный шаг труб в пучке.

Средний коэффициент теплоотдачи для труб первого ряда по направлению потока в коридорных и шахматных пучках равен

$$\alpha_1 = 0,6 \cdot \alpha_3. \quad (3.59)$$

Средний коэффициент теплоотдачи для труб второго ряда в коридорных и шахматных пучках равен:

а) коридорный пучок

$$\alpha_2 = 0,9 \cdot \alpha_3; \quad (3.60)$$

б) шахматный пучок

$$\alpha_2 = 0,7 \cdot \alpha_3, \quad (3.61)$$

где α_3 – коэффициент теплоотдачи для труб третьего ряда пучка.

Средний коэффициент теплоотдачи для всего пучка при его обтекании жидкостью или газом при смешанном режиме течения в зависимости от числа рядов по ходу движения флюида ($n \geq 3$) равен

$$\bar{\alpha} = [\alpha_1 + \alpha_2 + (n_2 - 2) \cdot \alpha_3] / n_2, \quad (3.62)$$

где n_2 – число рядов труб по направлению движения флюида (жидкости или газа).

4. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ И КИПЕНИИ

4.1. Теплоотдача при конденсации паров

4.1.1. Пленочная конденсация на вертикальной поверхности

Средняя в данном сечении скорость движения пленки равна [11]

$$\bar{w}(x) = \frac{\rho_{пл} g \cdot [\delta(x)]^2}{3\mu_{пл}}, \quad (4.1)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; x – координата, отсчитываемая от верхней точки поверхности, м; $\mu_{пл}$ – динамический коэффициент вязкости конденсата, Па·с; $\rho_{пл}$ – плотность пленки, кг/м³; $\delta(x)$ – толщина пленки конденсата в данном сечении, м.

$$\delta(x) = \sqrt[4]{\frac{4\lambda_{пл}\mu_{пл}(T_n - T_w) \cdot x}{g\rho_{пл}^2}}, \quad (4.2)$$

где $\lambda_{пл}$ – коэффициент теплопроводности пленки конденсата, Вт/(м·К); r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; T_n – температура насыщения при данном давлении, °С(К); T_w – температура стенки, °С(К).

Локальный коэффициент теплоотдачи находят по формуле

$$\alpha(x) = \frac{\lambda_{пл}}{\delta(x)} = \sqrt[4]{\frac{g\rho_{пл}^2\lambda_{пл}^3}{4\mu_{пл}(T_n - T_w) \cdot x}}. \quad (4.3)$$

Средний по всей поверхности коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации паров на вертикальной поверхности рассчитывают по формуле Нуссельта

$$\bar{\alpha} = 0,943 \cdot \sqrt[4]{\frac{gr \rho_{пл}^2 \lambda_{пл}^3}{\mu_{пл} (T_n - T_w) \cdot H}} \quad (4.4)$$

Внимание! Физические свойства жидкой пленки находят в справочнике по температуре насыщения при данном давлении.

Формулы (4.1) ÷ (4.4) для расчета основных гидродинамических параметров пленки и коэффициента теплоотдачи получены при *ламинарном* режиме течения [11]. Для учета зависимости физических свойств конденсата от температуры и *волнового* течения пленки в расчет вводят соответствующие поправки ε_t и ε_B

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{Nu} \varepsilon_t \varepsilon_B, \quad (4.5)$$

где $\bar{\alpha}_{Nu}$ – коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по формуле Нуссельта (4.4).

Поправку, учитывающую зависимость физических свойств пленки от температуры, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left[\left(\frac{\lambda_w}{\lambda_n} \right)^3 \cdot \left(\frac{\mu_n}{\mu_w} \right) \right]^{\frac{1}{8}}, \quad (4.6)$$

в которой λ_n и μ_n – коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости при температуре насыщения (T_n), а λ_w и μ_w – коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости при температуре стенки (T_w).

Поправку на волновое число находят по формуле

$$\varepsilon_B = Re^{0,04}. \quad (4.7)$$

4.1.2. Пленочная конденсация на наклонной поверхности

Средний коэффициент теплоотдачи на наклонной поверхности (рис. 4.1) рассчитывают по формуле

$$\bar{\alpha}_{накл} = \bar{\alpha}_{вертик} \cdot \sqrt[4]{\cos \varphi}, \quad (4.8)$$

где $\bar{\alpha}_{вертик}$ – коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по формуле Нуссельта (4.4) для вертикальной поверхности; φ – угол между направлением силы тяжести и осью Oх, направленной вдоль поверхности теплообмена.

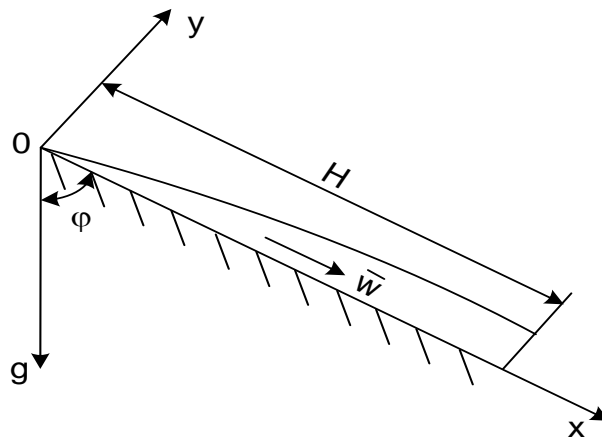


Рис. 4.1. К расчету пленочной конденсации пара на наклонной поверхности

4.1.3. Пленочная конденсация на горизонтальной трубе

Средний коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации на горизонтальной трубе (рис. 4.2) при ламинарном течении пленки конденсата рассчитывают по формуле Нуссельта, которая в этом случае имеет вид

$$\bar{\alpha} = 0,728 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \rho_{пл}^2 \lambda_{пл}^3}{\mu_{пл} (T_n - T_w) \cdot d_n}}, \quad (4.9)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; γ – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; $\lambda_{пл}$ – коэффициент теплопроводности пленки конденсата, Вт/(м·К); $\mu_{пл}$ – динамический коэффициент вязкости конденсата, Па·с; $\rho_{пл}$ – плотность пленки, кг/м³; T_n – температура насыщения при данном давлении, °С(К); T_w – температура стенки, °С(К); d_n – наружный диаметр трубы, м.

Формула (4.9) справедлива для ламинарного режима течения пленки, который существует, если выполняется условие

$$d_n < 20 \cdot \left(\frac{\sigma_{пл}}{g \cdot \rho_{пл}} \right)^{0,5}, \quad (4.10)$$

где $\sigma_{пл}$ – сила поверхностного натяжения пленки конденсата, Н/м, принимаемая по справочным данным при температуре насыщения.

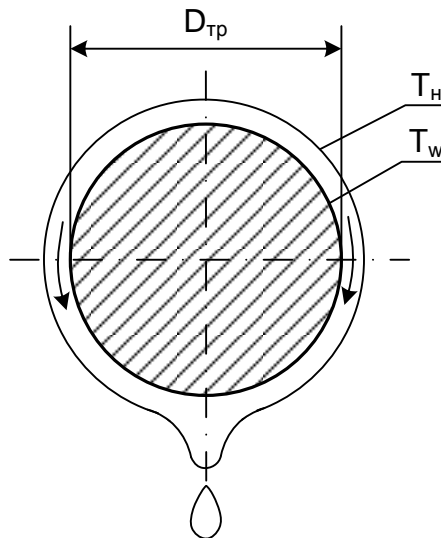


Рис. 4.2. К расчету пленочной конденсации пара на горизонтальной трубе

4.2. Теплоотдача при кипении жидкостей

4.2.1. Пузырьковое кипение в большом объеме

Средний коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме рассчитывают по формулам [16]

$$\alpha = 38,7 \cdot \Delta T^{2,33} \cdot p_H^{0,5}; \quad (4.11)$$

$$\alpha = 3,0 \cdot q^{0,7} \cdot p_H^{0,15}, \quad (4.12)$$

где ΔT – перегрев стенки, $^{\circ}\text{C}$ (К); p_H – давление насыщения (внешнее давление жидкости), бар; q – поверхностная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

4.2.2. Пленочное кипение в большом объеме

Используя аналогию процессов конденсации и пленочного кипения для расчета коэффициента теплоотдачи при пленочном кипении можно использовать следующие формулы:

а) кипение на вертикальной поверхности

$$\alpha = 0,943 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot r \cdot \rho_n \cdot (\rho_{ж} - \rho_n) \cdot \lambda_n^3}{\mu_n \cdot (T_w - T_n) \cdot H}}; \quad (4.13)$$

б) кипение на горизонтальной трубе

$$\alpha = 0,728 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot r \cdot \rho_n \cdot (\rho_{ж} - \rho_n) \cdot \lambda_n^3}{\mu_n \cdot (T_w - T_n) \cdot d_{тр}}}, \quad (4.14)$$

где ρ_n – плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$; λ_n – коэффициент теплопроводности пара, $\text{Вт}/(\text{мК})$; μ_n – динамический коэффициент вязкости пара, $\text{Па}\cdot\text{с}$; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; r – скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$; H – высота вертикальной поверхности, м; $d_{тр}$ – наружный диаметр горизонтальной трубы, м; T_n – температура насыщения при данном давлении, $^{\circ}\text{C}$ (К); T_w – температура стенки, $^{\circ}\text{C}$ (К).

В качестве определяющей температуры в формулах (4.13) и (4.14) принята температура насыщения пара при данном давлении.

4.2.3. Расчет кризисов кипения

Кризисы кипения зависят от рода кипящей жидкости, давления, состояния поверхности, условий смачивания, наличия примесей и поверхностно-активных добавок.

Согласно гидродинамической модели кризисов кипения С.С. Кутателадзе расчет максимальной плотности теплового потока при пузырьковом режиме кипения (первой критической тепловой нагрузки) выполняют по формуле

$$q_{кр,1} = 0,14 \cdot r \cdot \sqrt[4]{\sigma \cdot g \cdot (\rho_{ж} - \rho_n) \cdot \rho_n^2}, \quad (4.15)$$

где $\rho_{ж}$ и ρ_n – плотности жидкости и пара, $\text{кг}/\text{м}^3$; σ – сила поверхностного натяжения жидкости, $\text{Н}/\text{м}$; r – скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Перепад температур между стенкой и кипящей жидкостью соответствующий первой критической тепловой нагрузке $q_{кр,1}$ называют первым критическим температурным напором $\Delta T_{кр,1}$. Зная первую критическую тепловую нагрузку $q_{кр,1}$ и первый критический темпе-

ратурный напор $\Delta T_{кр1}$, коэффициент теплоотдачи в момент первого кризиса кипения (первый критический коэффициент теплоотдачи) находят по закону теплоотдачи Ньютона

$$\alpha_{кр1} = \frac{q_{кр1}}{\Delta T_{кр1}}. \quad (4.16)$$

Вторую критическую тепловую нагрузку рассчитывают также по формуле С.С. Кутателадзе

$$q_{кр,2} = C \cdot \rho_{п} \cdot r \cdot \sqrt[4]{\sigma g \cdot (\rho_{ж} - \rho_{п}) / \rho_{ж}^2}, \quad (4.17)$$

где $C = 0,11 \div 0,14$ – эмпирический коэффициент.

В качестве определяющей температуры в формулах (4.16) и (4.17) принята температура насыщения пара при данном давлении.

Замечание. Для приближенных расчетов второго кризиса кипения С.С. Кутателадзе рекомендует следующее соотношение:

$$\frac{q_{кр2}}{q_{кр1}} \approx 0,2. \quad (4.18)$$

4.2.4. Расчет теплоотдачи при кипении в трубах и каналах

Методика расчета коэффициента теплоотдачи при кипении и движении двухфазных потоков в трубах и каналах заключается в следующем.

1. Находят коэффициент теплоотдачи при кипении в большом объеме по формуле (4.12)

$$\alpha_{кип} = 3,0 \cdot q^{0,7} \cdot p_n^{0,15}.$$

2. Рассчитывают коэффициент теплоотдачи при вынужденном турбулентном течении в трубах и каналах по критериальной формуле М.А. Михеева (3.28)

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,021 \cdot Re_{f,d}^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \varepsilon_t \quad \text{и} \quad \alpha_{конв} = Nu \cdot \lambda / d,$$

где d – внутренний диаметр трубы или эквивалентный диаметр канала, м.

В качестве определяющей температуры при расчете теплоотдачи при кипении в ограниченном пространстве принимают температуру насыщения при данном давлении.

3. Определив $\alpha_{кип}$ и α_w , окончательный расчет коэффициента теплоотдачи α выполняют по алгоритму:

а) при $\alpha_{кип} / \alpha_{конв} > 2, \Rightarrow \alpha = \alpha_{кип}$;

б) при $\alpha_{кип} / \alpha_{конв} < 0,5, \Rightarrow \alpha = \alpha_{конв}$;

в) при $0,5 < \alpha_{кип} / \alpha_{конв} < 2, \Rightarrow \alpha = \alpha_{конв} \cdot \varepsilon_{кип}$,

где поправочный коэффициент на теплоотдачу при кипении рассчитывают по формуле Д.А. Лабунцова [17]

$$\varepsilon_{кип} = \frac{4 \cdot \alpha_w + \alpha_{кип}}{5 \cdot \alpha_w - \alpha_{кип}}. \quad (4.19)$$

5. РАСЧЕТ СРЕДНЕЙ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР ПРИ СЛОЖНОМ ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В РЕКУПЕРАТИВНОМ ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ

Уравнение теплопередачи в рекуперативном теплообменном аппарате имеет вид

$$Q = k \cdot \overline{\Delta T} \cdot F, \quad (5.1)$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $\overline{\Delta T}$ – средняя разность температур между горячим и холодным теплоносителями (средний температурный напор), °С; F – площадь поверхности теплообмена, м²; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Среднюю разность температур для прямоточной и противоточной схем движения теплоносителей рассчитывают по формулам:

$$\overline{\Delta T}_a = \frac{\Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}}{2}, \text{ если } \Delta T_{\max} / \Delta T_{\min} \leq 2 \quad (5.2)$$

или

$$\overline{\Delta T}_l = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}}, \text{ если } \Delta T_{\max} / \Delta T_{\min} > 2, \quad (5.3)$$

где ΔT_{\max} и ΔT_{\min} – максимальная и минимальная разности температур теплоносителей, °С; ΔT_a – среднеарифметическая разность температур, °С; ΔT_l – среднелогарифмическая разность температур, °С.

Для расчета средней разности температур при сложном движении теплоносителей строят температурный график $T = f(F)$ для противотока и $\overline{\Delta T}$ умножают на поправочный коэффициент $\varepsilon_{\Delta T}$, учитывающий особенности теплообмена при сложном токе. Графики для определения поправочного коэффициента $\varepsilon_{\Delta T}$ для разных схем перекрестного или сложного движения теплоносителей приведены на рис. 5.1 ÷ 5.6 [2]. Поправку $\varepsilon_{\Delta T}$ определяют в зависимости от значения комплексов P и R , которые рассчитывают по формулам

$$P = \delta T_2 / (T_1' - T_2'); \quad R = \delta T_1 / \delta T_2. \quad (5.4)$$

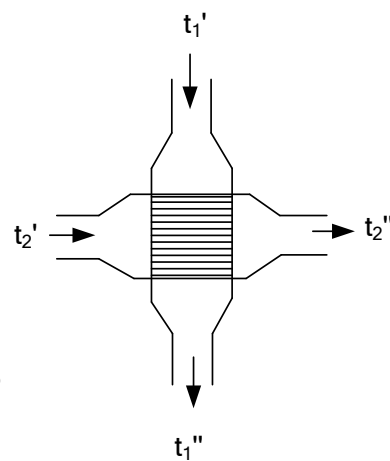
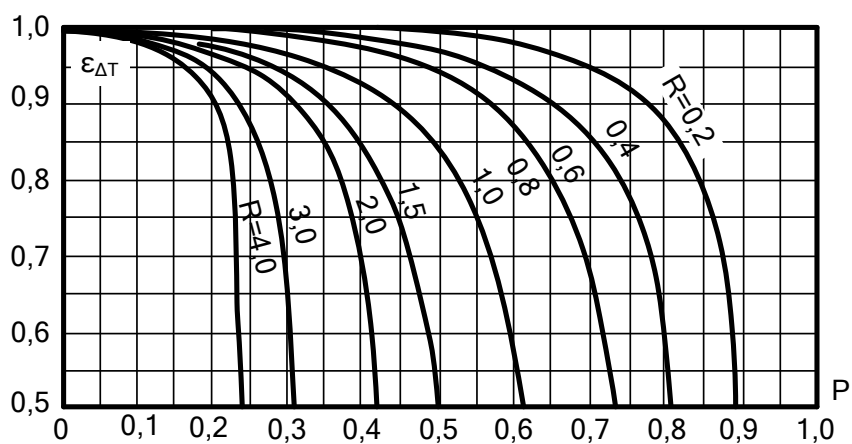


Рис. 5.1. $\epsilon_{\Delta T} = f(P, R)$

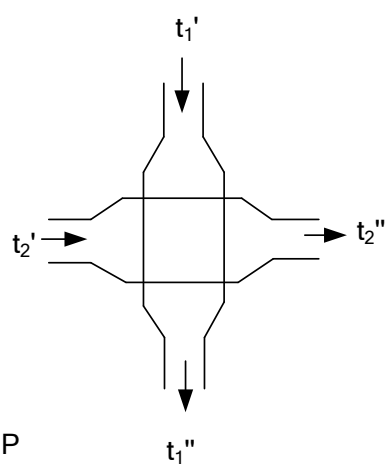
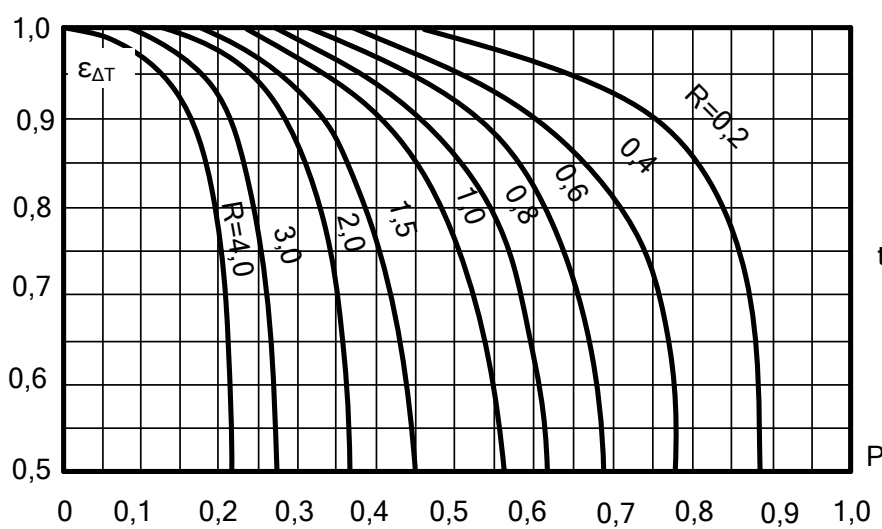


Рис. 5.2. $\epsilon_{\Delta T} = f(P, R)$

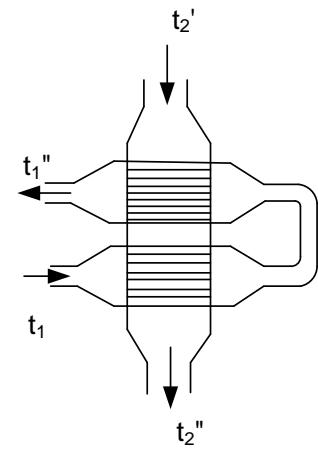
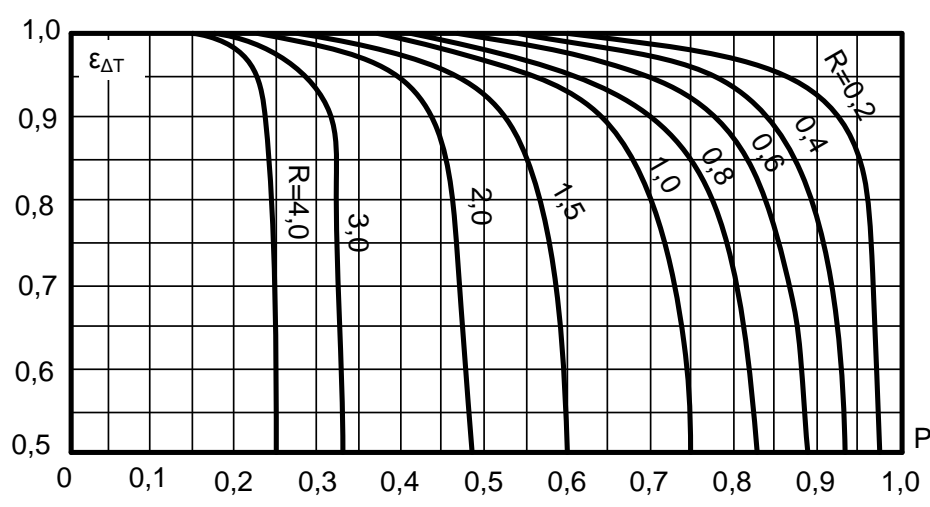


Рис. 5.3. $\epsilon_{\Delta T} = f(P, R)$

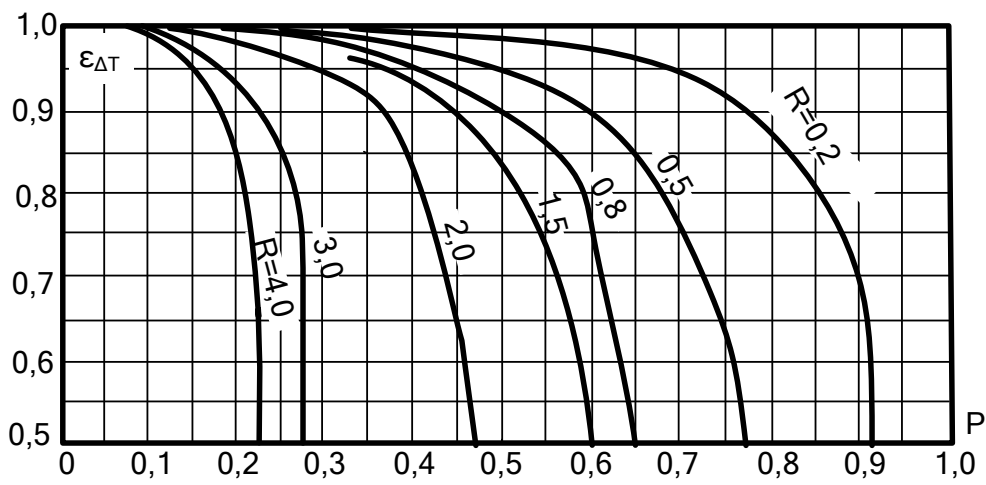


Рис. 5.4. $\varepsilon_{\Delta T} = f(P, R)$

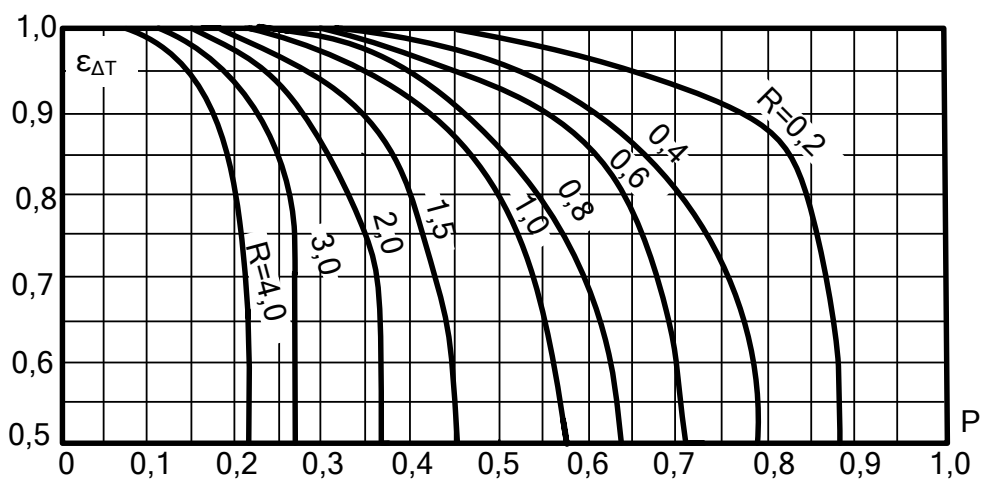


Рис. 5.5. $\varepsilon_{\Delta T} = f(P, R)$

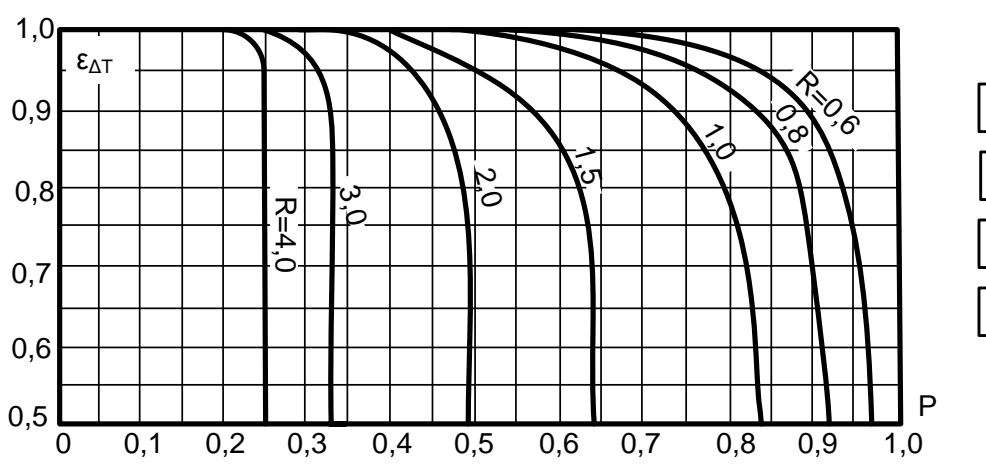


Рис. 5.6. $\varepsilon_{\Delta T} = f(P, R)$

6. РАСЧЕТ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

В инженерных расчетах лученепрозрачный (излучающий и поглощающий излучение) газ считают серым телом, а его объемное излучение заменяют излучением оболочки, в которую заключен газ. Поэтому плотность потока собственного излучения газа рассчитывают по формуле

$$E_r = \varepsilon_r \cdot E_{0,r} = \varepsilon_r \cdot \sigma_0 \cdot T_r^4 = \varepsilon_r \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_r}{100}\right)^4 = c_r \cdot \left(\frac{T_r}{100}\right)^4, \quad (6.1)$$

где ε_r – степень черноты газа; $c_r = \varepsilon_r \cdot c_0$ – коэффициент излучения газа, Вт/(м²·К⁴); T_r – температура газа, К.

Степень черноты газа зависит от его состава, температуры и объема, который занимает газ. Для продуктов сгорания энергетического топлива степень черноты газа рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}^* + \varepsilon_{SO_2}, \quad (6.2)$$

где ε_{CO_2} – степень черноты углекислого газа; $\varepsilon_{H_2O} = \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}^*$ – степень черноты водяного пара; $\varepsilon_{H_2O}^*$ – условная степень черноты водяного пара; β – поправочный коэффициент, учитывающий особенности излучения водяного пара; ε_{SO_2} – степень черноты сернистого газа. Степени черноты перечисленных газов определены экспериментально и в зависимости от их парциального давления, длины пути луча и температуры приведены в виде номограмм на рис. 6.1 – 6.2 [2]

$$\varepsilon_{r,i} = f(p_i \cdot S_{эф}, T_r),$$

где p_i – парциальное давление i – го газа, кПа; T_r – температура газа, °С (К); $S_{эф}$ – эффективная длина пути луча, м. Для газового объема произвольной формы эффективную длину пути луча рассчитывают по формуле

$$S_{эф} = 3,6 \cdot \frac{V_r}{F_r}, \quad (6.3)$$

где V_r – объем, занимаемый газом, м³; F_r – площадь оболочки, в которую заключен газ, м².

Поправочный коэффициент β находят по номограммам на рис. 6.3 [2] в виде $\beta = f(p_{H_2O} \cdot S_{эф}, p_{H_2O})$.

Существуют и аналитические зависимости для определения степени черноты CO₂, SO₂, H₂O и поправочного коэффициента β [7]:

$$\varepsilon_{RO_2} = \exp \left\{ - \left[1,4918 + 0,3980 \cdot C_{RO_2}^{-0,2609} + (0,053 - 0,1239 \cdot C_{RO_2}^{0,1718}) \cdot \frac{T_r}{100} + (0,003504 + 0,0009446 \cdot C_{RO_2}^{0,5470}) \cdot \left(\frac{T_r}{100}\right)^2 \right] \right\}; \quad (6.4)$$

$$\varepsilon_{HO_2} = \exp \left[0,5708 - 1,2016 \cdot C_{HO_2}^{-0,2146} - (0,0038 + 0,05133 \cdot C_{HO_2}^{-0,2105}) \cdot \frac{T_r}{100} \right]; \quad (6.5)$$

$$\beta = 1 + (-5,0 + 5,3114 \cdot C_{H_2O}^{-0,01191}) \cdot p_{H_2O}^{0,74 + 0,03705 \cdot C_{H_2O}^{-0,1561}}, \quad (6.6)$$

где $RO_2 = CO_2 + SO_2$; $C = p_i \cdot S_{эф}$; p_i – парциальное давление RO_2 или H_2O , $кгс/см^2$ ($1кгс/см^2 = 98100 Па$); $S_{эф}$ – эффективная длина пути луча, м; T_r – температура газа, $^{\circ}C$.

Формулы (6.4) и (6.5) применимы при $C = 0,01 \div 1,0$ и $T_r = 600 \div 1800 ^{\circ}C$, а формула (6.6) – при $C = 0,015 \div 3,0$ и $p_{H_2O} = 0 \div 0,6 кгс/см^2$.

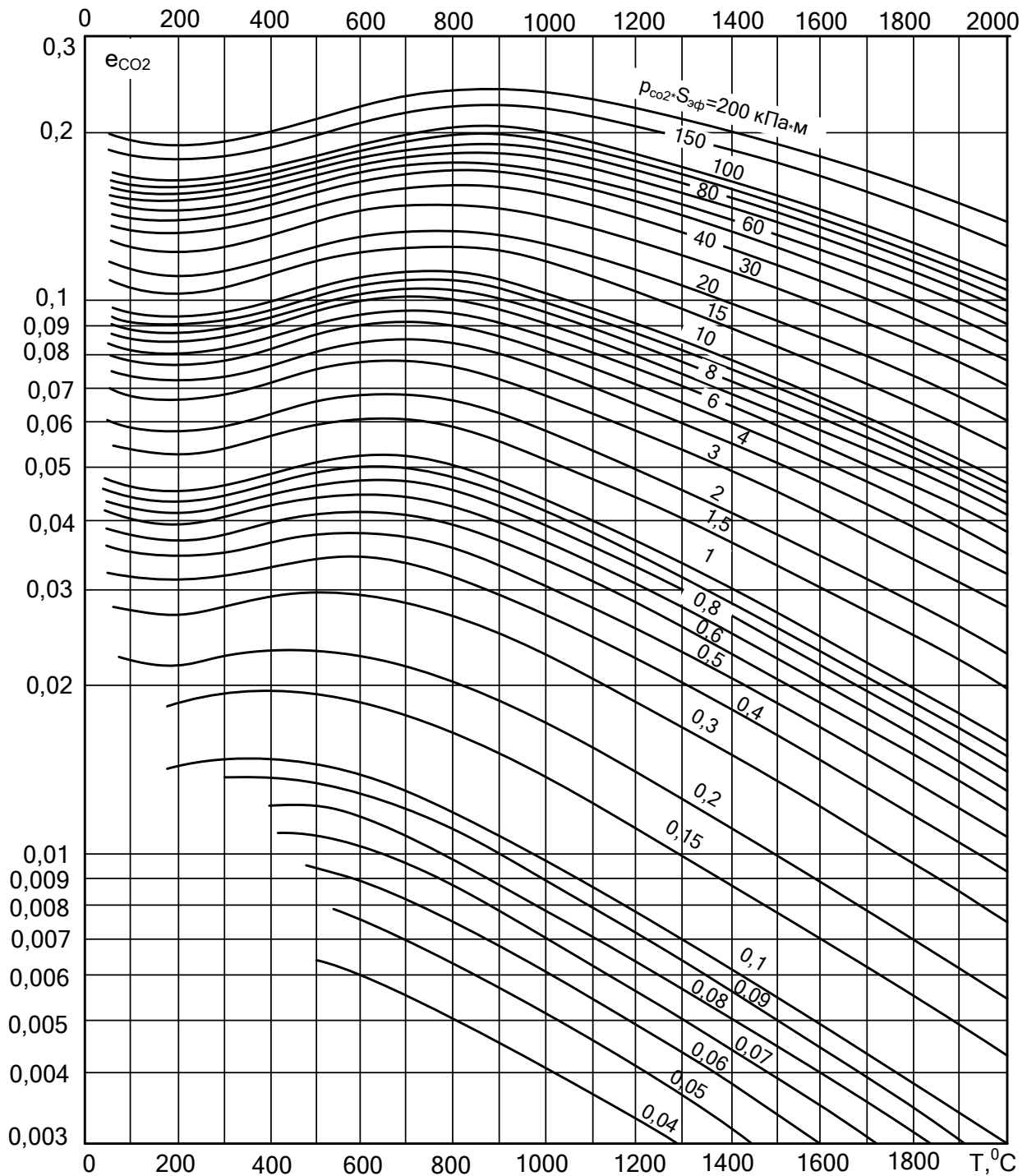


Рис. 6.1. Степень черноты двуокиси углерода $\epsilon_{CO_2} = f_1(p_{CO_2} \cdot S_{эф}, T)$

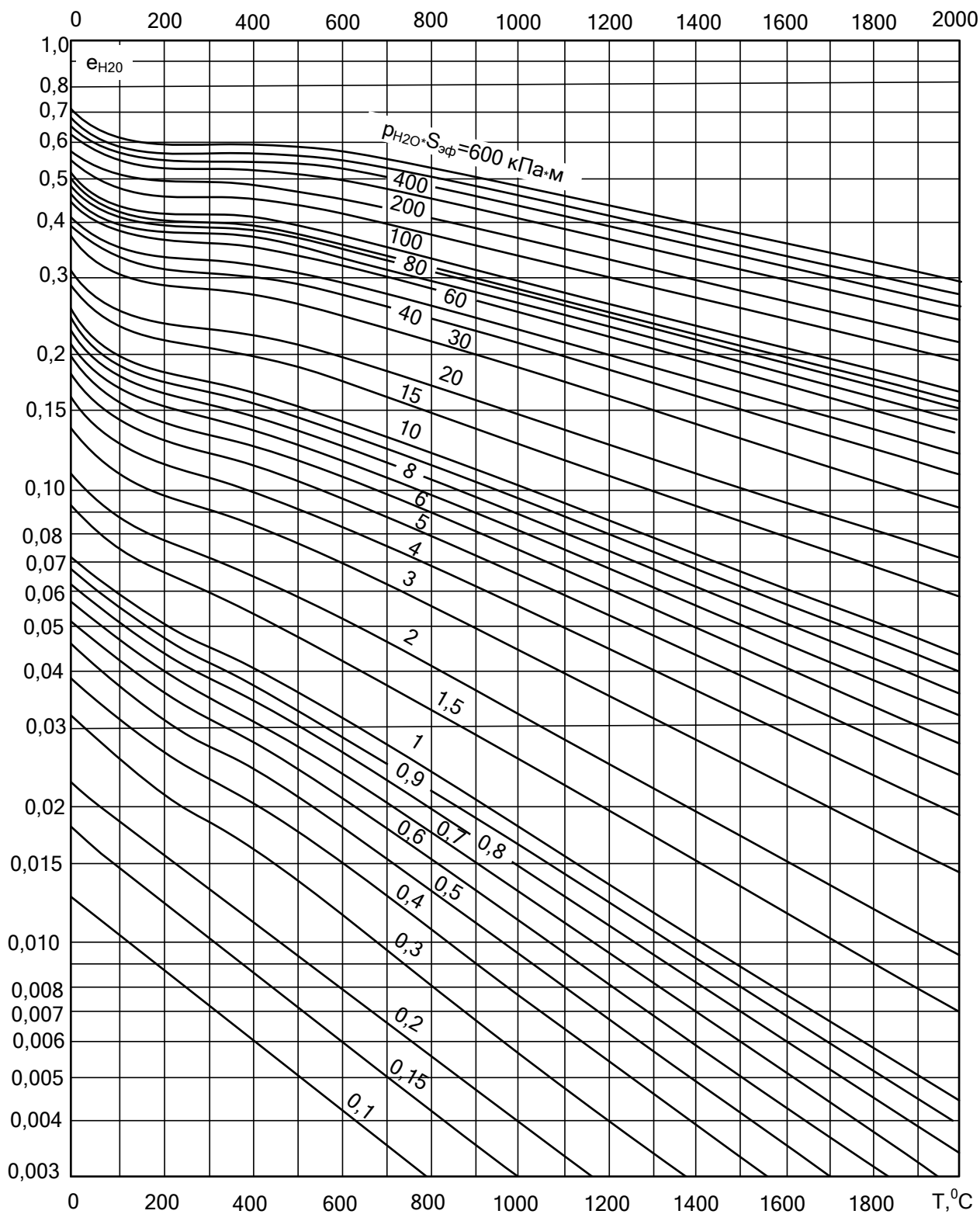


Рис. 6.2. Степень черноты водяного пара $\epsilon_{H_2O} = f_2(p_{H_2O} \cdot S_{эф}, T)$

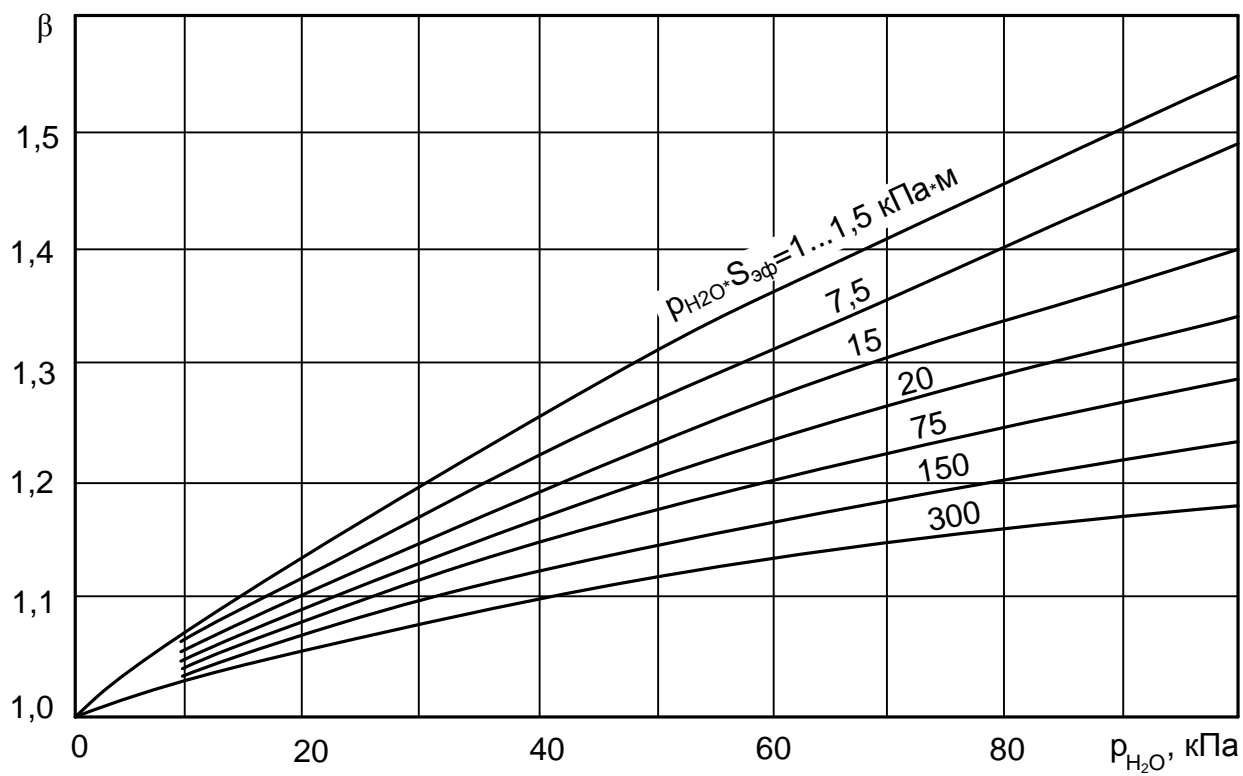


Рис. 6.3. Поправочный коэффициент β на парциальное давление для водяного пара

Перечень таблиц

Коэффициент теплопроводности

- строительных, теплоизоляционных и других материалов – табл.1.1 (с. 7)
- огнеупорных изделий – табл. 1.2 (с. 9)
- теплоизоляционных материалов и изделий – табл. 1.3 (с. 10), 1.51 (с. 45), 1.53 (с. 47)
- сталей – табл. 1.4 (с. 11)
- углеродистых сталей – табл. 1.7 (с. 13), 1.27 (с. 30)
- низколегированных сталей – табл. 1.30 (с. 33)
- высоколегированных сталей – табл. 1.38 (с. 36)
- хромистых сталей – табл. 1.35 (с. 35), 1.26 (с. 30)
- металлов и сплавов – табл. 1.5 (с. 11), 1.6 (с. 12), 1.15 (с. 20)
- цветных металлов и технических сплавов – табл. 1.29 (с. 32)
- чугунов – табл. 1.43 (с. 38)
- накипи – табл. 1.12 (с. 16)

Коэффициент температуропроводности

- металлов – табл. 1.16 (с. 22)
- углеродистых сталей – табл. 1.11 (с. 16)
- низколегированных сталей – табл. 1.34 (с. 35)
- высоколегированных сталей – табл. 1.42 (с. 37)

Максимальная рабочая температура

- огнеупорных изделий – табл. 1.2 (с. 9)
- теплоизоляционных материалов и изделий – табл. 1.3 (с. 10)

Плотность

- строительных, теплоизоляционных и других материалов – табл. 1.1 (с. 7)
- огнеупорных изделий – табл. 1.2 (с. 9)
- теплоизоляционных материалов и изделий – табл. 1.3 (с. 10)
- углеродистых сталей – табл. 1.10 (с. 15)
- низколегированных сталей – табл. 1.33 (с. 34)
- хромистых нержавеющей сталей – табл. 1.37 (с. 35)
- высоколегированных сталей – табл. 1.41 (с. 37)
- газов – табл. 1.67 (с. 61)

Удельная теплоемкость

- строительных, теплоизоляционных и других материалов – табл. 1.1 (с. 7)
- огнеупорных изделий и материалов – табл. 1.2 (с. 9), 1.49 (с. 44), 1.52 (с. 46)
- окислов – основных компонентов огнеупорных материалов и шлаков – табл. 1.20 (с. 25)
- теплоизоляционных материалов – табл. 1.50 (с. 44)
- углеродистых сталей – табл. 1.8 (с. 13), 1.9 (с. 14)
- низколегированных сталей – табл. 1.31 (с. 34), 1.32 (с. 34)
- хромистых нержавеющей сталей – табл. 1.36 (с. 35)
- высоколегированных сталей – табл. 1.39 (с. 36), 1.40 (с. 37)
- металлов – табл. 1.24 (с. 28)
- серых чугунов различного состава – табл. 1.46 (с. 41)
- газов – табл. 1.73 (с. 68)

Удельная энтальпия серых чугунов различного состава – табл. 1.46 (с. 41)

Удельное электросопротивление металлов – табл. 1.28 (с. 31)

Физические свойства

- твердых веществ (элементов) – табл. 1.14 (с. 19)
- графита – табл. 1.18 (с. 24)
- металлов и сплавов – табл. 1.25 (с. 29)
- жидких металлов и сплавов – табл. 1.64 (с. 58)
- огнеупорных изделий и материалов – табл. 1.48 (с. 43)
- трансформаторного масла – табл. 1.56 (с. 53)
- масла МС–20 – табл. 1.57 (с. 53)
- масла МК – табл. 1.58 (с. 54)
- ртути и некоторых расплавленных металлов – табл. 1.59 (с. 54)
- масла АМТ–300 – табл. 1.60 (с. 55)
- жидкого аммиака в состоянии насыщения – табл. 1.61 (с. 55)
- дифенильной смеси – табл. 1.62 (с. 56)
- жидкостей – табл. 1.63 (с. 56)
- сухого воздуха – табл. 1.65 (с. 60)
- дымовых газов – табл. 1.66 (с. 61)
- одноатомных газов – табл. 1.68 (с. 62)
- двухатомных газов – табл. 1.69 (с. 64)

- трехатомных газов – табл. 1.70 (с. 65)
- многоатомных газов – табл. 1.72 (с. 66)
- углеводородов метанового ряда C_nH_{2n+2} – табл. 1.71 (с. 65)
- воды при атмосферном давлении – табл. 1.74 (с. 69)
- воды в зависимости от давления – табл. 1.76 (с. 71)
- воды на линии насыщения – табл. 1.74 (с. 69)
- водяного пара на линии насыщения – табл. 1.75 (с. 70)

Механические свойства

- металлов – табл. 1.17 (с. 23)
- жароупорных сталей – табл. 1.45 (с. 40)

Предел прочности

- сталей и сплавов при повышенных температурах – табл. 1.19 (с. 24)
- сталей в зависимости от температуры – табл. 1.44 (с. 39)

Средний коэффициент линейного расширения металлов – табл. 1.22 (с. 27)

Химический состав

- огнеупорных изделий – табл. 1.21 (с. 25), 1.47 (с. 42)
- углеродистых сталей – табл. 1.23 (с. 27)

Молярная масса газов – табл. 1.67 (с. 61)

Интегральная степень черноты материалов – табл. 1.13 (с. 16), 1.54 (с. 49), 1.55 (с. 51)

Справочная литература

1. **Промышленные печи.** Справочное руководство для расчетов и проектирования / под ред. Казанцева Е.И. – М.: Metallurgy, 1975. – 368 с.
2. **Краснощеков, Е.А.** Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
3. **Промышленная теплоэнергетика** и теплотехника: справочник. – М., 1983.
4. **Чечёткин, А.В.** Высокотемпературные теплоносители/ А.В. Чечёткин. – М.: Энергия, 1971.
5. **Михеев, М.А.** Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
6. **Бухмиров, В.В.** Нестационарная теплопроводность. Справочные материалы для решения задач: метод. указания № 2085 / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 36 с.
7. **Маковский, В.А.** Алгоритмы управления нагревательными печами / В.А. Маковский, И.И. Лаврентик. – М., Metallurgy, 1977. – 184 с.
8. **Ривкин, С.Л.** Теплофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
9. **Зигель, Р.** Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. – М.: Мир, 1975. – 935 с.
10. **Кириллов, П.Л.** Тепломассообмен в ядерных энергетических установках / П.Л. Кириллов, Г.П. Богословская. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.
11. **Исаченко, В.П.** Теплопередача: учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
12. **Цветков, Ф.Ф.** Задачник по тепломассообмену / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко; под ред. Ф.Ф. Цветкова. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 136 с.
13. **Солодов, А.П.** Практикум по теплопередаче: учеб. пособие для вузов / А.П. Солодов, Ф.Ф. Цветков, А.В. Елисеев, В.А. Осипова; под ред. А.П. Солодова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.
14. **Теплотехнический справочник** / под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. Т. 2. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.
15. **Галин, Н.М.** Тепломассообмен (в ядерной энергетике) / Н.М. Галин, Л.П. Кириллов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 376 с.
16. **Михеев, М.А.** Основы теплопередачи / М.А. Михеев. – М.; Л.: ГЭИ, 1956. – 390 с.
17. **Бухмиров, В.В.** Тепломассообмен: учеб. пособие / В.В. Бухмиров; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.

**СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
ПО КУРСУ «ТЕПЛОМАССОБМЕН»**

Учебное пособие

Составители БУХМИРОВ Вячеслав Викторович
РАКУТИНА Дарья Валерьевна

Редактор Т.В. Соловьёва

Подписано в печать

Формат 60×84¹/₁₆.

Печать плоская. Усл.печ.л.

Тираж 300 экз. Заказ №

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34