

В. С. Чиркин

**Теплофизические свойства
материалов**

Справочное руководство

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621
ББК 34.4
В11

В11 **В. С. Чиркин**
Теплофизические свойства материалов: Справочное руководство / В. С. Чиркин – М.: Книга по Требованию, 2012. – 356 с.

ISBN 978-5-458-36095-1

ISBN 978-5-458-36095-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

д) Вычисление теплопроводности сталей (таблицы 312—316)	255
е) Теплопроводность чугунов (табл. 317)	259
2. Углеродистые стали (табл. 318—362)	260
3. Легированные стали (табл. 363—391)	271
4. Высоколегированные стали, обладающие жаропрочностью и жаростойкостью (табл. 392—430)	284
Глава VII. Пористые и дисперсные материалы (теплоизоляционные, строительные керамики, графит и карбиды)	
1. Свойства теплоизоляционных и строительных материалов (табл. 431)	302
2. Объемные веса и теплопроводности для некоторых строительных и теплоизоляционных материалов (табл. 432—439)	304
3. Бетон (табл. 440—445)	319
4. Керамические материалы	326
а) Окись бериллия (табл. 446—450)	326
б) Фарфоры и фаянсы (табл. 451, 452)	328
в) Окислы (табл. 453, 454)	329
г) Огнеупоры (табл. 455, 456)	332
5. Графит (табл. 457—467)	333
6. Карбиды	338
а) Карбид кремния (табл. 468—472)	338
б) Карбид бериллия (табл. 473—476)	340
в) Карбид циркония (табл. 477, 478)	341
г) Карбид титана (табл. 479—481)	342
д) Карбид молибдена	344
е) Карбид урана (табл. 482, 483)	344
ж) Карбид бора	345
з) Карбид вольфрама	345
и) Карбид алюминия	346
к) Свойства некоторых карбидов (табл. 484)	346
Литература	347
Предметный указатель	353

ПРЕДИСЛОВИЕ

Теплофизические свойства материалов изменяются в широких пределах в зависимости от физико-химических параметров и от способов изготовления. В данной книге эти свойства приведены с учетом химического состава, структуры, метода приготовления и в зависимости от температуры и давления.

Вещества типа кристаллического алмаза, платины и т. д., для которых параметры можно определить с очень высокой точностью, применяются в технике редко и являются малодоступными для массового использования. Очень чистые вещества применяются главным образом для исследовательских целей и опытных работ (исключение составляют полупроводниковые и фармацевтические материалы). В практике обычно имеют дело с различными материалами, содержащими примеси в пределах, определяемых технологическими допусками. Так, например, сталь ЭЯ1Т содержит хрома от 17 до 20 %, никеля от 8 до 11 %, титана от 0,3 до 1,0 % и примесей других элементов до 1,75 %.

Технический кислород имеет примеси азота и других газов до 1,5 % весовых. Медицинский кислород (он же используется и для лабораторных целей) имеет примеси других газов до 0,1 %.

Наличие примесей и их доля существенно отражаются на теплофизических свойствах материалов, и этим нельзя пренебрегать при решении большинства инженерных задач.

Следует также отметить, что современные измерения, несмотря на высокую точность, обычно дают некоторую систематическую ошибку, так что измерения одного и того же параметра разными методами приводят к неодинаковым результатам. Вследствие этого в справочной литературе теплофизические свойства часто имеют несогласующиеся значения или являются справедливыми для узкой области температур; кроме того, они даются без учета строения материала и метода его обработки. Наличие таких неполноценных данных приводит к необходимости отыскивать значения температуры плавления и кипения, энтальпии, теплоемкости, теплопроводности, удельного веса, вязкости и других теплофизических данных для многих материалов по различным литературным источникам и сопоставлять их между собой с целью выбора наиболее достоверных значений.

В настоящей книге сделана попытка частично заполнить существующий в этой области пробел созданием справочной книги, удовлетворяющей требованиям широкого круга инженерно-технических работников, участвующих в проектировании и эксплуатации разнообразной промышленной аппаратуры.

Разрозненные данные по теплофизическим свойствам газов, жидкостей и металлов, а также строительных и теплоизоляционных материалов подобраны и сведены в таблицы. При этом учтены в пределах возможного данные о строении материалов и методах их обработки. В тех случаях, когда имелись противоречивые данные, производилось сравнение имеющихся значений, иногда сопровождающееся экспериментальной проверкой, с тем чтобы выделить наиболее достоверные значения параметров. Подбор теплофизических параметров для таблиц, приведенных в книге, а также обзор основных теоретических соотношений, определяющих величины физических параметров, сделаны преимущественно по отечественным литературным источникам.

При составлении книги использованы материалы Комиссии по атомной энергии США, справочники Landolt—Börnstein (издания 1951 г.), Д. Кэй и Т. Лэби (ИЛ, 1949) и другие, а также различные работы, опубликованные в журналах «Атомная энергия», «Техническая физика», «Теплоэнергетика», «Phys. Rev.», «Nucleonics», «Bull. Am. Phys. Soc.» и в ряде других.

Глава I книги посвящена краткой характеристике рассматриваемых теплофизических величин. Здесь же приведены переводные коэффициенты из одной размерности в другую для температуры, теплоемкости, теплопроводности, вязкости, удельного веса и других параметров.

Главы II и III содержат теплофизические свойства воздуха и его компонент, в том числе инертных газов, а также свойства углекислоты и окиси углерода. Тут же приводятся теплофизические характеристики водорода и водородсодержащих веществ (углеводородов, спиртов, масел, жидких и газообразных топлив).

Свойства воды и водяного пара даны в главе IV сокращенно, поскольку имеются более подробные данные в специальной литературе и, в частности, в таблицах М. П. Вукаловича «Термодинамические свойства воды и водяного пара» (Машгиз, 1955).

В главах V и VI даны краткие теплофизические характеристики металлов. Здесь также приводятся систематизированные данные для металлических теплоносителей и редкоземельных металлов, ранее имевших ограниченное применение, а в настоящее время являющихся обязательными для многих современных машин, аппаратов и приборов. В группу металлов с низкой температурой плавления, имеющих назначение теплоносителей, включена сера. Глава VI содержит сведения по наиболее распространенным углеродистым, легированным и высоколегированным сталям.

Глава VII книги посвящена свойствам пористых и дисперсных материалов, бетона, графита и карбидов.

Поскольку справочник предназначен для теплофизиков, работающих в области положительных температур, в нем приводятся данные преимущественно для температур выше 0°C и лишь в самой сжатой форме для отрицательных температур.

В работе над книгой автору была оказана большая помощь по методическим вопросам коллективом преподавателей и научных работников Московского инженерно-физического института кафедры теплофизики и заведующим этой кафедрой членом-

корреспондентом АН СССР, проф. И. И. Новиковым. Некоторые контрольные измерения проводились студентами МИФИ, так например, коэффициенты теплопроводности окислов урана, бериллия, графитов, сталей и т. п. измерялись А. В. Римашевским (1954 г.), М. В. Бабушкиной (1955 г.), Л. М. Тетериним (1956 г.), К. А. Чекандиной (1957 г.) и другими. Теплопроводность и температуропроводность измерялись на установках конструкции В. А. Груздева.

Книга может быть полезной инженерам-конструкторам современного машино и приборостроения, научным работникам исследовательских учреждений и студентам соответствующих высших учебных заведений.

Книга является одной из первых попыток создания систематизированного справочника основных теплофизических параметров для материалов современной техники и в силу этого не может претендовать на исчерпывающую полноту. Кроме того, развитие теории и особенно техники измерения теплофизических параметров идет сравнительно быстро, и в настоящей книге поэтому неизбежны пробелы. Автор заранее выражает благодарность всем, кто сообщит ему о замеченных недостатках и погрешностях

Автор

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ¹⁾

- a — коэффициент температуропроводности ($\text{м}^2/\text{час}$)
 a_k — ударная вязкость для сталей ($\text{кгм}/\text{см}^2$).
 C — молярная теплоемкость $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \right)$.
 C_p — то же при постоянном давлении $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \right)$.
 C_v — то же при постоянном объеме $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \right)$.
 c — теплоемкость единицы веса вещества $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$.
 c_p — то же при постоянном давлении $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$.
 c_v — то же при постоянном объеме $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right)$.
 c'_p, c'_v — те же теплоемкости, отнесенные к 1 м^3 газа при нормальных условиях $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{н.м}^3 \cdot \text{град}} \right)$.
 d — влагосодержание ($\text{г}/\text{кг}$ сухого воздуха).
 E — модуль упругости ($\text{кг}/\text{см}^2$).
 g — ускорение силы тяжести ($\text{м}/\text{сек}^2$).
 H_B — твердость по Бринеллю.
 l — энтальпия (или теплосодержание) моля вещества ($\text{ккал}/\text{моль}$).
 i — энтальпия (или теплосодержание) единицы веса вещества ($\text{ккал}/\text{кг}$).
 i', i'' — то же для жидкости и пара.
 K — электропроводность ($1/\text{ом} \cdot \text{см}$).
 L — число Лоренца $\left(\frac{\text{вт} \cdot \text{ом}}{\text{град}^2}, \frac{\text{вт}^2}{\text{град}^2} \right)$.
 m — масса тела $\left(\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}} \right)$.
 p — давление ($\text{кг}/\text{см}^2$).
 $p_{\text{кр}}$ — давление в критической точке ($\text{кг}/\text{см}^2$).
 $P_{\text{тр}}$ — сила трения (кг).
 Pr — критерий Прандтля.

¹⁾ Здесь приводятся обозначения, встречающиеся в книге систематически.

- q — тепловой поток или тепловая нагрузка $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \right)$.
 R_t — сопротивление платинового термометра сопротивления (ом)
 $r_{\text{исп}}$ — теплота испарения (ккал/кг).
 $r_{\text{пл}}$ — теплота плавления (ккал/кг).
 S — энтропия моля вещества $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \right)$.
 s — энтропия единицы веса вещества $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right)$.
 s', s'' — то же соответственно для жидкости и пара.
 T — температура по шкале Кельвина, °К.
 $T_{\text{пл}}$ — температура плавления, °К.
 t — температура по международной стогоградусной шкале, °С.
 $t_{\text{пл}}, t_{\text{кип}}$ — температуры плавления и кипения, °С.
 $t_{\text{кр}}$ — температура в критической точке, °С.
 V — объемный процент примесей к стали (%).
 V_0 — объем тела при 0°К ($\text{м}^3, \text{см}^3$).
 v — удельный объем ($\text{м}^3/\text{кг}$).
 v', v'' — удельные объемы жидкости и пара ($\text{м}^3/\text{кг}$).
 $v_{\text{кр}}$ — удельный объем в критической точке ($\text{м}^3/\text{кг}$).
 α — коэффициент теплового линейного расширения ($1/\text{град}$).
 $\alpha_{\parallel}$ и $\alpha_{\perp}$ — то же, соответственно вдоль и поперек ориентации кристаллов ($1/\text{град}$).
 β — коэффициент теплового объемного расширения ($1/\text{град}$).
 γ — удельный вес ($\text{кг}/\text{м}^3, \text{г}/\text{см}^3$).
 γ', γ'' — то же для жидкости и пара.
 $\gamma_{\text{кр}}$ — то же в критической точке.
 γ_n — насыпной вес сыпучих материалов ($\text{кг}/\text{м}^3$).
 δ — относительное удлинение при растяжении (%).
 η — коэффициент вязкости $\left(\frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{сек}} \right)$.
 λ — коэффициент теплопроводности $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{час}} \right)$.
 $\lambda_{\parallel}$ и $\lambda_{\perp}$ — то же при тепловом потоке соответственно параллельно или перпендикулярно ориентации кристаллов.
 μ — коэффициент динамической вязкости $\left(\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2} \right)$.
 μ — коэффициент Пуассона (величина безразмерная).
 ν — коэффициент кинематической вязкости ($\text{м}^2/\text{сек}$).
 ρ — удельное электрическое сопротивление (ом·см).
 ρ — плотность вещества $\left(\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4} \right)$.
 σ — коэффициент поверхностного натяжения (кг/м).
 σ_b — предел прочности на разрыв ($\text{кг}/\text{см}^2$).
 $\sigma_{b\parallel}, \sigma_{b\perp}$ — то же соответственно параллельно или перпендикулярно ориентации кристаллов.
 σ_s — предел текучести ($\text{кг}/\text{см}^2$).
 ψ — относительное сужение (%)

Г Л А В А I

ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ИХ РАЗМЕРНОСТИ

1. Температура

Международная температурная стогоградусная шкала [1, 2] основана на воспроизведении постоянных (реперных) температур фазового равновесия ряда чистых веществ.

Градус стогоградусной международной температурной шкалы отмечается символом °C, а *температура* по этой шкале обозначается через t .

Т а б л и ц а 1

**Основные постоянные точки международной стогоградусной
шкалы температур**

Вещества, находящиеся в равновесии	Температура (°C) при нормальном ат- мосферном давлении ¹⁾ (t_{760})	Соотношение для вычисления температуры при давлении p мм ртутного столба
Кислород жидкий и га- зообразный (кисло- родная точка)	—182,97	$t_p = t_{760} + 0,0126 (p - 760) -$ $- 0,0000065 (p - 760)^2$
Лед и вода, насыщенная воздухом (ледяная точка)	0,000	—
Вода и водяной пар (паровая точка) . . .	100,000	$t_p = t_{760} + 0,0367 (p - 760) -$ $- 0,000023 (p - 760)^2$

(Продолжение табл. на след. стр.)

¹⁾ Нормальное, или стандартное, атмосферное давление определяется как давление, производимое столбом ртути, имеющей плотность 13,5951 г/см³, в 760 мм высотой при ускорении силы тяжести 980, 665 см/сек². Оно равно 1 013 250 дн/см².

Продолжение табл. 1

Вещества, находящиеся в равновесии	Температура (°C) при нор- мальном ат- мосферном давлении (t_{100})	Соотношение для вычисления температуры при давлении p мм ртутного столба
Жидкая сера и ее пары (серная точка) . . .	444,60	$t_p = t_{760} + 0,0909 (p-760) -$ $- 0,000048 (p-760)^2$
Твердое серебро и жид- кое серебро (серебря- ная точка)	960,5	—
Твердое золото и жид- кое золото (золотая точка)	1 063,0	—

Термодинамическая температурная шкала определяется при помощи реперных точек для воды; 0°C соответствует температуре 273,16° K.

Градус абсолютной термодинамической температурной шкалы отмечается символом °K, а температура по этой шкале обозначается через T [3].

Термодинамическая, или универсальная, температура определяется на основании обратимого цикла Карно [4] с источниками тепла Q_1 и Q_2 , имеющими температуры T_1 и T_2 , из условия

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Если между двумя телами осуществляется обратимый цикл Карно с полученной и отданной теплотами Q_1 и Q_2 , то величина $\frac{Q_1}{Q_2}$ дает искомое отношение термодинамических температур обоих тел. Термический к. п. д. цикла определяется соотношением

$$\eta_T = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Здесь при $Q_2 = 0$ $\eta_T = 1$; это значит, что при температуре нагреваемого тела, равной нулю ($T_2 = 0$), все подведенное тепло Q_1 перешло бы в работу. Так как η_T не может быть больше единицы, то нуль термодинамической температуры представляет собой наименьшую из всех возможных температур, называемую поэтому *абсолютным нулем* температуры.

Значения термодинамических температур точки таяния льда, полученные различными методами, даны в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Термодинамическая температура точки таяния льда, °С

Метод	H ₂	N ₂	Воз- дух	CO ₂	He
Эффект Джоуля—Томсона . . .	273,14	273,09	—	273,05	—
Экстраполяция к нулевому давлению	273,07	273,09	—	—	—
Эффект Джоуля—Томсона . . .	273,5	—	273,19	273,10	—
Экстраполяция к нулевому давлению	{ —	{ —	{ —	{ —	273,16
	{ —	{ —	{ —	{ —	273,16
	{ —	{ —	{ —	{ —	273,14
	{ —	{ —	{ —	{ —	273,17

Вероятное среднее 273,16°

Между стоградусной международной шкалой и термодинамической шкалой существует некоторое расхождение. Например, в интервале от 0° С до точки кипения серы или кислорода между этими шкалами разность составляет около 0,05° (по термодинамической шкале температура кипения серы 444,64° С, а по стоградусной 444,60° С).

Термодинамическая шкала разделяется на следующие четыре области:

а) От 0° С до точки затвердевания сурьмы температура t определяется формулой

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2).$$

Здесь R_t — сопротивление при температуре t платиновой проволоки эталонного термометра сопротивления между точками разветвления, образованными токовыми и потенциальными проводами; R_0 — сопротивление этого же термометра при 0° С; постоянные A и B можно определить, измеряя значение R_t для точек кипения воды и серы.

б) От точки кипения кислорода до 0° С температура определяется формулой

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3],$$

где R_t , R_0 , A и B вычисляются так же, как это предлагается в п а), а постоянную C определяют, измеряя значение R_t в точке кипения кислорода.

в) От точки затвердевания сурьмы до точки затвердевания золота температура t определяется формулой

$$E = a + bt + ct^2,$$

где E — э. д. с. эталонной платина-платинородиевой термопары, когда один из ее спаев находится при 0° С, а другой — при температуре t ° С. Константы a , b , c определяют исходя из измеренных значений E в точках затвердевания сурьмы, серебра и золота.

Помещая термометр сопротивления и термопару в пространство с вполне однородной температурой, можно эталонировать термопару путем непосредственного сравнения ее с термометром сопротивления

Платиновая проволока должна быть отожжена, а ее чистота должна быть такой, чтобы отношение $\frac{R_{100}}{R_0}$ превышало 1,3910. Проволока сплава должна содержать 90% (по весу) Pt и 10% (по весу) Rh. В точках затвердевания сурьмы (630,5°С), серебра и золота термопара должна давать следующие э. д. с.:

$$E_{Au} = 10\,300 \pm 5 \text{ мкв.}$$

$$E_{Au} - E_{Ag} = 1185 + 0,158 (E_{Au} - 10\,310) \pm 3 \text{ мкв.},$$

$$E_{Au} - E_{Sb} = 4776 + 0,631 (E_{Au} - 10\,310) \pm 5 \text{ мкв.}$$

г) Выше точки затвердевания золота температура t определяется формулой

$$\frac{J_t}{J_{Au}} = \frac{e^{C_2/\lambda (t_{Au} + T_0)} - 1}{e^{C_2/\lambda (t + T_0)} - 1},$$

где J_t и J_{Au} — энергии излучения при длине волны λ в интервале длин волн, равном единице, за единицу времени на единицу поверхности черного тела соответственно при температуре t и при температуре затвердевания золота t_{Au} ; C_2 — константа, равная 1,438 см · град; T_0 — температура плавления льда в °К.

Помимо стоградусной шкалы Цельсия (°C) применяются также и шкалы Фаренгейта (°F) (в Америке и Англии) и Реомюра (°R). Между температурными шкалами существуют следующие зависимости:

$$1^\circ \text{C} = \frac{4}{5}^\circ \text{R} = \frac{9}{5}^\circ \text{F}; \quad 1^\circ \text{R} = \frac{5}{4}^\circ \text{C} = \frac{9}{4}^\circ \text{F},$$

$$1^\circ \text{F} = \frac{4}{9}^\circ \text{R} = \frac{5}{9}^\circ \text{C}.$$

$$t_C = \frac{5}{4} t_R = \frac{5}{9} (t_F - 32), \quad t_R = \frac{4}{5} t_C = \frac{4}{9} (t_F - 32),$$

$$t_F = \frac{9}{5} t_C + 32 = \frac{9}{4} t_R + 32$$

Здесь t_C , t_R , t_F — соответственно температуры по Цельсию, Реомюру и Фаренгейту.