

В.Н. Богословский

**Строительная теплофизика
(теплофизические основы
отопления, вентиляции и
кондиционирования воздуха)**

Учебник для вузов

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 62-63
ББК 30.6
В11

В.Н. Богословский
В11 Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов / В.Н. Богословский – М.: Книга по Требованию, 2021. – 416 с.

ISBN 978-5-458-42004-4

ISBN 978-5-458-42004-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

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.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И РАЗМЕРНОСТИ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН

Q — тепловой поток, тепловая мощность, Вт/(ккал/ч);	φ — относительная влажность воздуха;
q — плотность теплового потока Вт/м ² [ккал/(м ² ·ч)];	$\varphi\theta$ — относительный потенциал влажности;
T, t — температура, К (°С);	α — влагопроводность, кг/(м ² ·ч·°В);
τ — температура поверхности, К (°С);	i — плотность потока влаги, кг/(м ² ·ч);
Δt — разность температур, К (°С);	η — влагоемкость, (кг/кг)/°В;
δ — избыточная температура, К (°С);	β — коэффициент влагообмена, кг/(м ² ·ч·°В);
θ — относительная избыточная величина (температура, потенциал влажности и др.);	μ — химический потенциал, Дж/кг (ккал/кг);
z — время, ч, с;	δ — толщина, м;
T — период времени, ч, с;	\emptyset — калибр;
C — излучение поверхности, Вт/(м ² ·К ⁴) [ккал/(м ² ·ч·К ⁴)];	a_f — ширина в два калибра;
e — относительный коэффициент излучения;	e — протяженность, м;
E — интенсивность лучистого потока, Вт/м ² [ккал/(м ² ·ч)];	f — фактор формы;
φ — коэффициент облученности (угловой коэффициент);	h — высота помещения или прибора, м;
Φ — коэффициент полной облученности;	H — высота здания, м;
α — коэффициент теплообмена, Вт/(м ² ·К) [ккал/(м ² ·ч·°С)];	A — амплитуда колебания величины (температуры, теплового потока и др.);
β — коэффициент температурного расширения (объемный) 1/К(1/°С);	ν — показатель затухания амплитуды колебания температуры;
g — ускорение силы тяжести, м/с ² ;	ε — запаздывание во времени колебаний, ч;
ν — коэффициент кинематической вязкости, м ² /с;	D — условная толщина, показатель тепловой массивности, теплоинерционность;
ρ — плотность (объемная масса), кг/м ³ ;	S — теплоусвоение материала Вт/(м ² ·К) [ккал/(м ² ·ч·°С)];
λ — теплопроводность, Вт/(м·К) [ккал/(м·ч·°С)];	Y — показатель теплоусвоения, Вт/(м ² ·К) [ккал/(м ² ·ч·°С)];
c — массовая теплоемкость, Дж/(кг·К) [ккал/(кг·°С)];	B, ρ — показатель теплопоглощения, Вт/(м ² ·К)[ккал/(м ² ·ч·°С)];
K — коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К) [ккал/(м ² ·ч·°С)];	Ω — коэффициент прерывистости;
R — термическое сопротивление м ² ·К/Вт (м ² ·ч·°С/ккал);	Λ — показатель интенсивности конвективного теплообмена, Вт/К [ккал/(ч·°С)];
L — объемный расход воздуха, м ³ /ч;	s — коэффициент проводимости воздуха, кг/(м ² ·Па ²) [кг/(м ² ×ч·мм вод. ст. ²)];
i — массовый расход воздуха, кг/(м ² ·ч);	R_{μ} — сопротивление воздухопроницаению, м ² ·ч·Па/кг (м ² ·ч(кг/м ²)/кг)
P — давление, Па (кг/м ²); мм рт. ст.; мм вод. ст);	k — аэродинамический коэффициент;
u — влагосодержание, отнесенное к массе сухого материала, кг/кг;	v — скорость, составляющая скорости по оси x , м/с;
θ — потенциал влажности, °В;	u — составляющая скорости по оси y , м/с;

τ — касательное напряжение, Н/м^2 (кг/м^2);
 μ — коэффициент динамической вязкости, $\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$ ($\text{кг} \cdot \text{с/м}^2$);
 $K_{об}$ — коэффициент обеспеченности;
 J — энтальпия влажного воздуха, Дж/кг (ккал/кг);
 d — влагосодержание влажного воздуха, кг/кг ;
 Π — приведенные затраты, руб/м^2 ;
 S — стоимость (тепла, материала), руб. на единицу продукции;
 C — отчисления на амортизацию и ремонт;
 I — интенсивность суммарной солнечной радиации, Вт/м^2 [$\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$];
 S — то же, прямой, Вт/м^2 [$\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$];
 D — то же, рассеянной, Вт/м^2 [$\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$];
 R — то же, отраженной, Вт/м^2 [$\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$];
 a — коэффициент отражения

излучения поверхностью (альбедо);
 ρ — коэффициент поглощения излучения поверхностью;
 τ — коэффициент проницания излучения;
 k — коэффициент поглощения излучения в толще полупрозрачного материала, $1/\text{м}$;
 ϵ — направление луча процесса в $I-d$ -диаграмме, Дж/кг (ккал/кг).

Критерии

Bi — Био
 Pr — Прандтля
 Gr — Грасгофа
 Ra — Рэлея
 Re — Рейнольдса
 Nu — Нуссельта
 Ar — Архимеда
 Kp — Кондратьева
 Fo — Фурье
 Bo — Больцмана
 Sk — Старка

ВВЕДЕНИЕ

Строительная наука состоит из большого числа разделов, затрагивающих разные отрасли знаний. Многие из этих разделов, бывшие до недавнего времени частями физики, механики, геологии и других наук, превратились в настоящее время в самостоятельные научные дисциплины. Одной из таких дисциплин является строительная теплофизика, в которой изучаются явления передачи тепла, переноса влаги, фильтрации воздуха применительно к строительству.

Для строителей важны многие вопросы, относящиеся к области строительной теплофизики. Это промерзание, пучение грунтов и их взаимодействие с инженерными сооружениями в районах сезонного промерзания грунтов и в области «вечной мерзлоты»; тепловлажностный режим гидротехнических сооружений, особенно в зоне переменного горизонта воды и фильтрации грунтовых вод; вопросы морозостойкости материалов, сушки изделий, процессы тепло- и массообмена при твердении бетона и изготовлении строительных деталей и конструкций на заводах.

Среди всех строительных сооружений здания подвержены наиболее сложным физическим воздействиям. Процессы тепло- и массообмена в помещениях зданий и ограждающих конструкциях, которые рассматриваются в книге, связаны с действием наружных климатических условий, а также с работой систем кондиционирования микроклимата.

Климат нашей страны исключительно разнообразен. В районе Оймякона в Якутии расположен полюс холода обжитых районов Земли, где температура понижается до -71° при среднегодовой температуре -17° . (Полюс абсолютного холода Земли расположен в районной станции Восток в Советском секторе Антарктиды. Здесь температура понижается до $-87,6^{\circ}$ при среднегодовом ее значении около -50°). В Узбекистане (г. Термез) температура повышается до $+48^{\circ}$ при среднегодовой температуре $+18^{\circ}$. Во многих пунктах побережья Ледовитого океана отопительный период продолжается весь год, в то время как в отдельных районах Средней Азии и Кавказа он продолжается менее трех месяцев, например в Батуми, Гагре — 75 дней. Но в жарких районах необходимо защищать здания от перегрева солнечной радиацией и обеспечивать искусственное охлаждение помещений в течение продолжительного жаркого периода года.

Климат большей части территории нашей страны более суров, чем других государств. Представление об этом дает табл. В.1, в которой сопоставлены характерные наружные температуры по данным многолетних наблюдений для некоторых городов мира.

Строительная теплофизика как научная дисциплина начала развиваться в нашей стране сравнительно недавно (с 20-х годов). Для ее развития много сделано инженерами-строителями и строителями-

Т а б л и ц а 4 В.1

Географический пункт	Географическая широта	Среднемесячные температуры, °С	
		наиболее жаркого месяца	наиболее холодного месяца
Москва	55°52'	17,9	-10,2
Ташкент	41°40'	27,4	-1,1
Париж	48°51'	18	2
Афины	37°59'	27	9
Токио	35°42'	25	3
Сан-Франциско	37°45'	25	10
Квебек	46°49'	19	-12

теплотехниками В. Д. Мачинским, Г. А. Селиверстовым, О. Е. Власовым, К. Ф. Фокиным, С. И. Муромовым, Р. Е. Бриллингом, Б. Ф. Васильевым, В. М. Ильинским, Ф. В. Ушковым, Н. С. Ермолаевым, А. М. Шкловером, Л. А. Семеновым, С. Н. Шориным, М. И. Киссиным и др. В 50-х годах в строительной теплофизике произошли качественные изменения в связи с исследованиями А. В. Лыкова и его физико-математической школы. Сложные теплофизические задачи в строительстве решаются теперь современными математическими и физическими

методами с применением теории подобия, методов аналогии, счетно-решающих устройств и т. д.

Строительная теплофизика рассматривает вопросы, относящиеся к области деятельности специалистов по конструкциям зданий и системам кондиционирования микроклимата. На рис. В. 1. условно показаны эти области. Теплотехники-строители занимаются вопросами создания микроклимата в помещении, применяя системы кондиционирования (отопления — охлаждения и вентиляции) с учетом влияния наружного климата через ограждения.

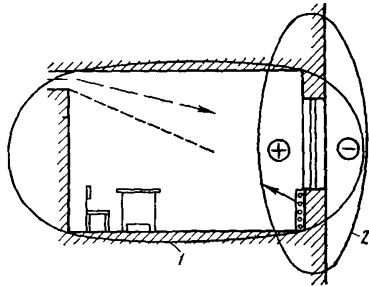


Рис. В. 1. Сферы теплофизики помещения (1) и ограждения (2)

Строителей, специалистов по конструкциям зданий, интересует режим ограждений под действием внутренних условий и наружного климата в связи с долговечностью конструкций и их эксплуатационными свойствами.

Полносорное строительство зданий и его инженерного оборудования из крупноразмерных элементов с применением высокоэффективных материалов является основным направлением развития современной строительной техники.

С переходом к новому виду высотной, многоэтажной застройки создаются и совершенствуются конструкции элементов сборных зда-

ний, используются новые теплоизоляционные, облицовочные и конструктивные материалы с разнообразными физическими свойствами.

В настоящее время в полносборном строительстве наряду с большими успехами имеется ряд недостатков, которые связаны с малой изученностью, а в ряде случаев и с недооценкой вопросов строительной теплофизики.

В мире происходит гигантское потребление энергии, которое постоянно возрастает. Ежедневно сжигается то, что Земля накапливала тысячу лет. По оценкам международных организаций, потребление энергоресурсов к концу XX в. возрастет в 2,5 раза по сравнению с 1975 г. и составит 18 — 21 млрд. т условного топлива (тут). При этом будет потребляться ~80% органического топлива (уголь — 30%, нефть — 32% и газ — 18%), запасы которого ограничены, 7% — гидроэнергии и 13% атомной энергии.

Советский Союз — единственная промышленно развитая страна, живущая за счет собственных энергоресурсов. Топливо-энергетический комплекс, созданный в нашей стране, поглощает $\frac{1}{3}$ всех капиталовложений в промышленность и строительство и значительную часть всех материальных и трудовых ресурсов. Отмечается постоянное повышение стоимости топлива, возрастает дальность его транспортировки. В соответствии с постановлением Госстроя СССР от 11 января 1979 г. стоимость замыкающего топлива при экономических оценках проектных решений увеличена в среднем по всей территории страны в два раза. В последних постановлениях ЦК КПСС и Совета Министров СССР неизменно подчеркивается исключительная важность вопросов эффективного и экономного использования энергии.

В строительной индустрии расходуется много энергии, но главное состоит в том, что основной объект строительства — здания и сооружения — потребляют огромное количество топливно-энергетических ресурсов. Расход топлива на теплоснабжение зданий составляет 40% всего добываемого топлива. При этом на жилые и общественные здания расходуется 26% (в городах — 18%, в сельской местности — 8%), на промышленные здания — 14%. Удельная теплопотребность в строительстве, к сожалению, не сокращается. В современных зданиях потребность в тепле больше, чем в зданиях 50—60-х годов строительства. В результате основной энергетической задачей в области строительства является проектирование зданий и сооружений с эффективным использованием энергии, модернизация существующего фонда зданий в целях экономии энергии.

Рассмотренные в учебнике вопросы должны дать будущему инженеру-строителю знания в области строительной теплофизики, которые позволят ему решать важные для страны задачи эффективного и экономичного расходования топливно-энергетических ресурсов в области строительства.

ГЛАВА I

ТЕПЛООБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ

§ 1.1. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЗДАНИЯ

Тепловым режимом здания называется совокупность всех факторов и процессов, определяющих тепловую обстановку в его помещениях.

Помещения здания (рис. 1.1) изолированы от внешней среды ограждающими конструкциями, что позволяет создать в них определенный микроклимат. Наружные ограждения защищают помещения от непосредственных атмосферных воздействий, а специальные системы кондиционирования поддерживают определенные заданные параметры внутренней среды. Совокупность всех инженерных средств и устройств, обеспечивающих заданные условия микроклимата в помещениях здания (ограждающие конструкции, солнцезащитные устройства, другие конструктивно-планировочные средства, а также системы отопления — охлаждения, вентиляции, кондиционирования воздуха), называют системой кондиционирования микроклимата (СКМ)

Под действием разности наружной и внутренней температур, солнечной радиации и ветра помещение теряет тепло через ограждения зимой и нагревается летом. Гравитационные силы, действие ветра и вентиляция создают перепады давлений, приводящие к перетеканию

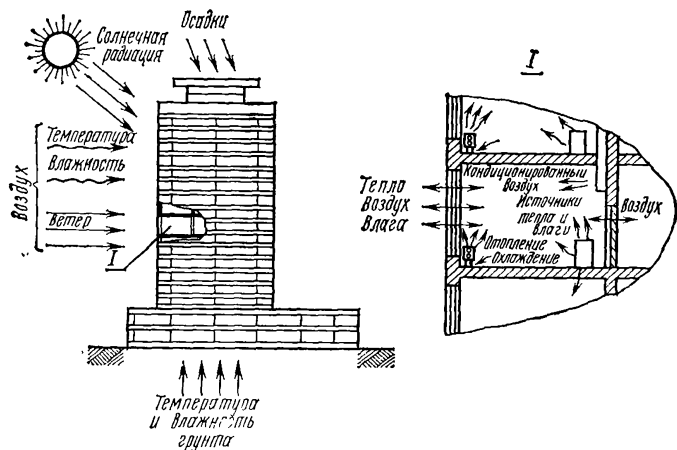


Рис. 1.1. Различные виды воздействий на тепловой, воздушный и влажностный режимы помещения в здании

воздуха между сообщающимися помещениями и к его фильтрации через поры материала и неплотности ограждений. Атмосферные осадки, влаговыделения в помещениях, разность влажности внутреннего и наружного воздуха приводят к влагообмену через ограждения, под влиянием которого возможно увлажнение материалов и ухудшение защитных свойств и долговечности наружных стен и покрытий.

Процессы, формирующие тепловую обстановку помещения, необходимо рассматривать в неразрывной связи между собой, ибо их взаимное влияние может оказаться весьма существенным. Например, фильтрация воздуха и увлажнение конструкций могут в несколько раз увеличить теплопотери помещения зимой. В то же время создание благоприятной воздушной среды в помещении требует организации его воздухообмена и влагообмена с наружной средой.

§ 1.2. ТЕПЛОБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ

При эксплуатации зданий определяющим является тепловой режим помещений, от которого зависит ощущение теплового комфорта людей, нормальное протекание производственных процессов, состояние и долговечность конструкций здания и его оборудования. Тепловая обстановка в помещении определяется совместным действием ряда факторов: температуры, подвижности и влажности воздуха помещения, наличием струйных течений, распределением параметров воздуха в плане и по высоте помещения, а также радиационным излучением окружающих поверхностей, зависящим от их температуры, геометрии и радиационных свойств. Под действием конвективного и лучистого теплообмена и процессов массопереноса температуры воздуха и поверхностей в помещении взаимосвязаны и оказывают воздействие друг на друга.

Для изучения формирования микроклимата, его динамики и способов воздействия на него нужно знать законы теплообмена в помещении.

Общая схема теплообмена в помещении приведена на рис. 1.2. Из нее следует, что в помещении в обмене теплом участвует ряд элементов. Это воздух основного (не занятого струйными течениями) объема помещения, поверхности, обращенные в помещение, струи воздуха, внешние среды (наружный воздух, теплохладоноситель в приборах системы отопления — охлаждения). Между перечисленными элементами происхо-

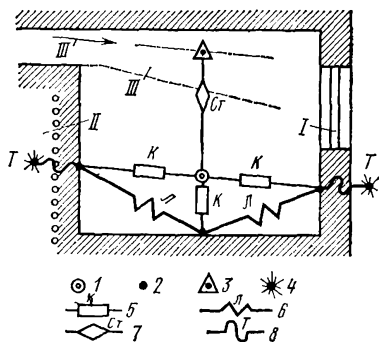


Рис. 1.2. Общая схема теплообмена в помещении:

1 — воздух основного объема помещения; 2 — поверхности, обращенные в помещение; 3 — струи воздуха; 4 — внешняя среда; 5 — конвективный теплообмен; 6 — лучистый теплообмен; 7 — струйный теплообмен; 8 — теплообмен теплопроводностью; I — наружное ограждение; II — панель (отопительный прибор) системы отопления (охлаждения); III — неизотермическая струя приточного воздуха

дят следующие виды обмена теплом. Конвективный (K) теплообмен возникает между воздухом и поверхностями ограждений и приборов системы отопления — охлаждения, лучистый (L) теплообмен — между отдельными поверхностями. В результате турбулентного перемешивания неизотермических струй воздуха с воздухом основного объема помещения происходит «струйный» ($Ст$) теплообмен. Внутренние поверхности наружных ограждений в основном теплопроводностью (T) через толщину конструкций и теплообменом передают тепло наружному воздуху, а поверхности приборов также теплопроводностью и теплообменом — теплохладоносителю системы отопления — охлаждения.

Важной составляющей сложного процесса, формирующего тепловой режим помещения, является теплообмен на поверхностях. Тепловой баланс любой поверхности i в помещении (рис. 1.2) в стационарных и нестационарных условиях может быть представлен на основе закона сохранения энергии уравнением

$$L_i + K_i + T_i = 0. \quad (1.1)$$

Лучистая L_i , конвективная K_i и кондуктивная (теплопроводностью) T_i составляющие теплообмена на поверхностях в помещении могут изменяться во времени, иметь различную величину и знак, но уравнение (1.1) остается неизменным для всех поверхностей в стационарных и нестационарных условиях теплообмена. Исключения составляют поверхности, на которых происходят явления, связанные с дополнительным выделением и поглощением тепла (испарение воды или конденсация водяного пара, облучение сосредоточенным источником тепла и пр.). Для таких условий в уравнение теплового баланса (1.1) необходимо ввести слагаемые, учитывающие наличие дополнительных источников или стоков тепла.

Температуры поверхностей в помещении неодинаковы. Обычно зимой и летом наружные ограждения и приборы систем отопления — охлаждения бывают более нагретыми или охлажденными по сравнению с внутренними стенами, которые имеют температуру, близкую к температуре воздуха в помещении. Между поверхностями происходит теплообмен излучением, подчиняющийся общим физическим закономерностям, пользоваться которыми в инженерных расчетах сложно. Лучистый теплообмен в помещении происходит в условиях ограниченного диапазона значений температур, определенных радиационных свойств поверхностей, геометрии их расположения и пр.

Рассмотрим особенности излучения поверхностей и лучистого теплообмена в помещении, с тем чтобы упростить задачу и получить достаточно точную и простую методику для инженерного расчета.

§ 1.3. СВОЙСТВА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Все поверхности помещения являются источниками теплового излучения. Тепловые лучи, идущие от нагретых поверхностей, представляют собой электромагнитные волны, тождественные по своей природе видимому свету, радиоволнам и др. Электромагнитные коле-

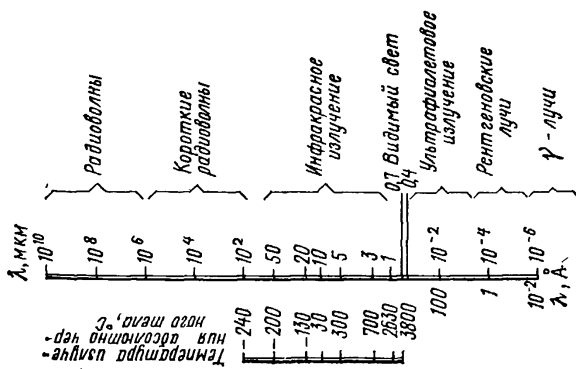


Рис. 1.3. Шкала электромагнитных излучений (температура излучения соответствует максимальной интенсивности излучения λ)

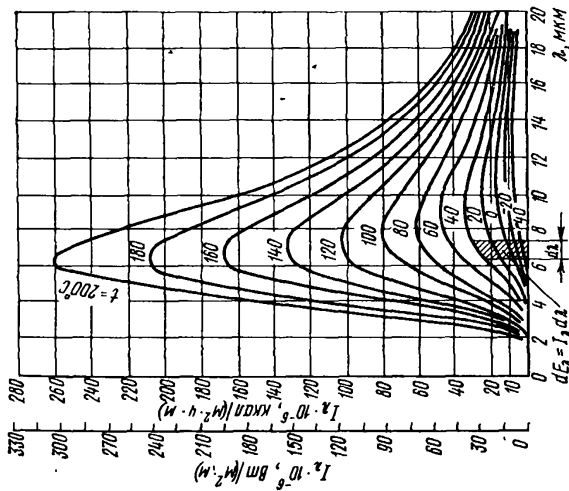


Рис. 1.4. Спектральная интенсивность излучения поверхности абсолютно черного тела как функция длин волн при различных температурах

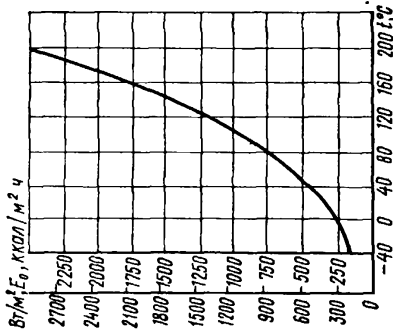


Рис. 1.5. Интенсивность интегрального излучения абсолютно черного тела в зависимости от температуры

бания различаются по длине волны λ . Ее измеряют в метрах (м), микрометрах (мкм) или ангстремах (\AA), причем $1 \text{ м} = 10^6 \text{ мкм} = 10^{10} \text{ \AA}$. На рис. 1.3 приведена классификация электромагнитных колебаний в зависимости от длины волны. Как видно из рисунка, тепловое излучение в основном приходится на инфракрасный участок спектра.

Спектральная интенсивность излучения поверхности I_λ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{м}$) \times [ккал/($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{м}$)] абсолютно черного тела в зависимости от длины волн и обычного для помещений диапазона температур приведена на рис. 1.4. Значения I_λ , приведенные на этом графике, соответствуют закону Планка. Тепловое излучение при достаточно низких температурах, характерных для поверхностей в помещении, захватывает сравнительно узкий участок длин волн и может рассматриваться как монохроматическое, т. е. состоящее из волн одинаковой длины. Учитывая близкую к параболической форму кривых на рис. 1.4, можно в качестве осредненной принимать длину волны, соответствующую максимальной интенсивности излучения $\lambda_{\text{макс}}$. Ее величина определяется законом Вина

$$\lambda_{\text{макс}} = a/T, \quad (1.2)$$

где a — постоянная излучения, равная $0,29 \text{ см} \cdot \text{К}$.

При температурах поверхности T в помещении от 0 до 150°C (от 273 до 423 К) длины волн $\lambda_{\text{макс}}$ находятся в пределах от 11 до 7 мкм .

Замена полихроматического излучения монохроматическим есть первое возможное упрощение в расчете теплового излучения поверхностей в помещении.

По графику рис. 1.4 для абсолютно черного тела с произвольной температурой можно определить интенсивность излучения $dE_0 = I_\lambda d\lambda$, Вт/ м^2 [ккал/($\text{м}^2 \cdot \text{ч}$)], соответствующую определенному участку длины волны, который лежит в интервале от λ до $\lambda + d\lambda$.

Интенсивность излучения нагретой поверхности для всего спектра длин волн может быть определена интегрированием зависимостей, графики которых приведены на рис. 1.4. Величина интегральной интенсивности излучения E_0 , Вт/ м^2 [ккал/($\text{м}^2 \cdot \text{ч}$)], определяется законом Стефана — Больцмана:

$$E_0 = \int_0^\infty I_\lambda d\lambda = C_0 (T/100)^4, \quad (1.3)$$

где C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ [$4,96 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}^4)$].

Зависимость E_0 от температуры показана на рис. 1.5.

Поверхности в помещении являются серыми телами. В отличие от абсолютно черных серые тела излучают меньше тепла и падающий на них лучистый поток полностью ими не поглощается, а частично отражается (закон Кирхгофа).

Между строительными материалами — проводниками и диэлектриками имеется существенное различие в радиационных свойствах по отношению к инфракрасному излучению. Проводники отражают, а диэлектрики поглощают большую часть падающего на них инфракрас-