

Физика среды и ограждающих конструкций

ТЕПЛООБМЕН В ПОМЕЩЕНИИ

Лекция № 1. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЗДАНИЯ

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

Помещения здания (рис. I.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

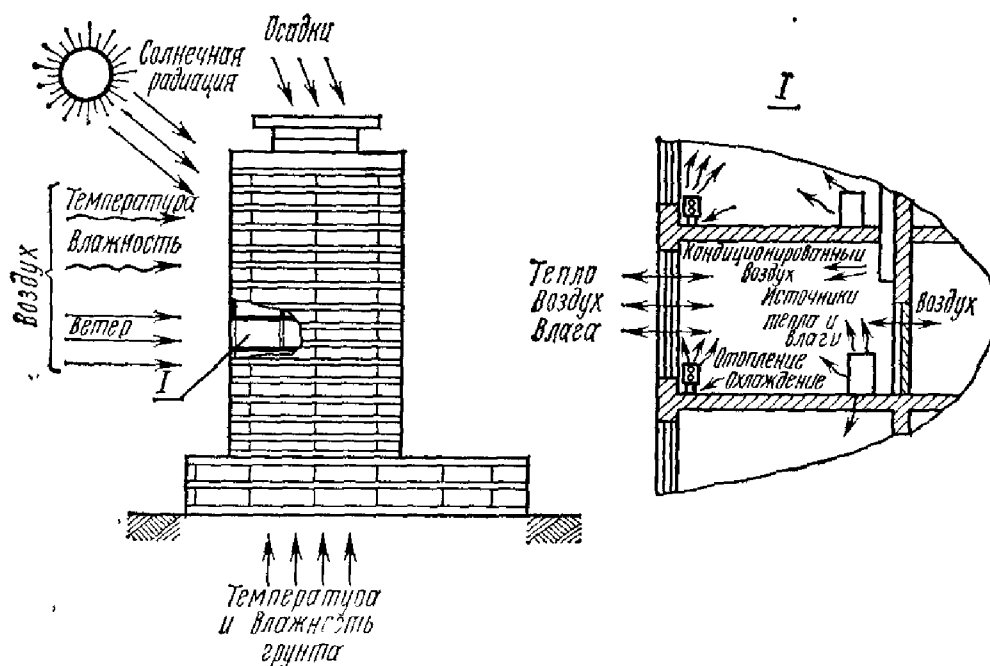


Рис. I.1. Различные виды воздействий на тепловой, воздушный и влажностный режимы помещения в здании

воздуха между сообщающимися помещениями и к его фильтрации через поры материала и неплотности ограждений. Атмосферные осадки, влаговыведения 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.

Лекция № 2. ТЕПЛООБМЕН 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-

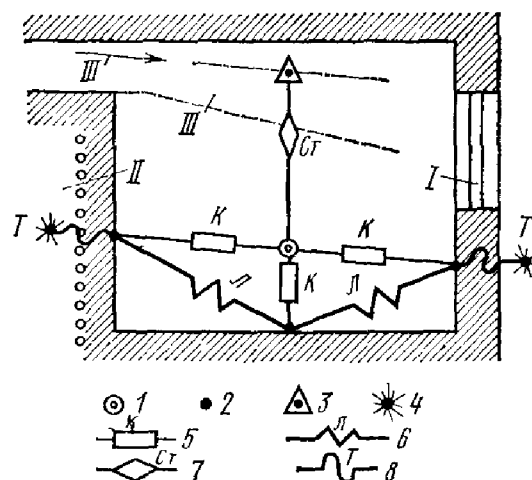


Рис. 1.2. Общая схема теплообмена в помещении:

1 — воздух основного объема помещения; 2 — поверхности, обращенные в помещение; 3 — струя 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. Исключение 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.

Лекция № 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-

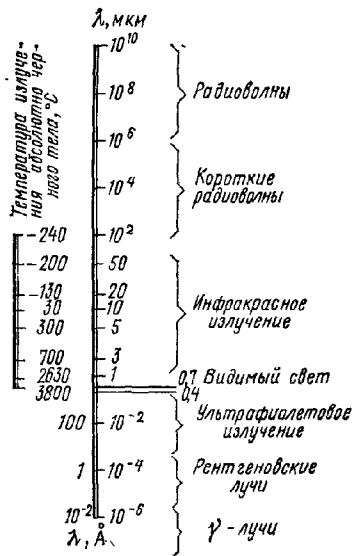


Рис. 1.3. Шкала электромагнитных излучений (температура излучения соответствует максимальной интенсивности излучения λ)

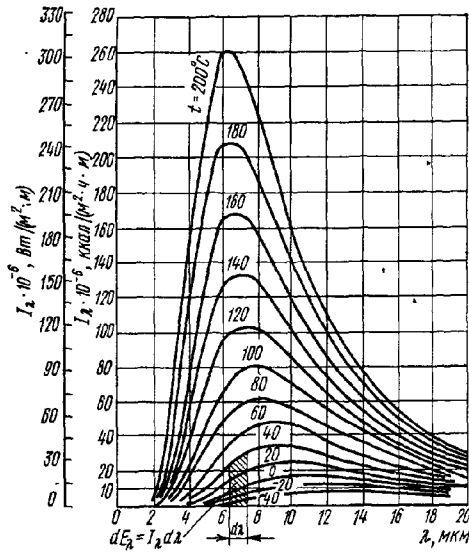


Рис. 1.4. Спектральная интенсивность излучения поверхности абсолютно черного тела как функция длин волн при различных температурах

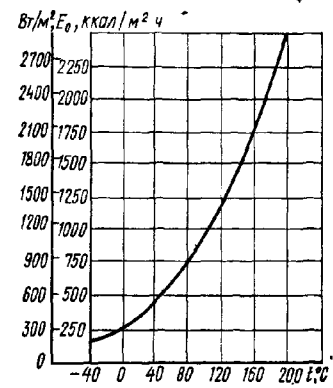


Рис. 1.5. Интенсивность интегрального излучения абсолютно черного тела в зависимости от температуры

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 $I_\lambda \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{м} \times [\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{м}]$ 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 [$\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$], 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 [$\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$], 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 $5,77 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ [$4,96 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}^4$].

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-

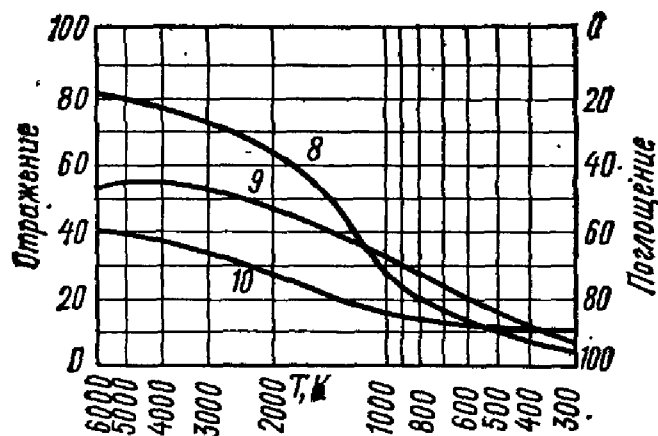


Рис. 1.6. Отражательная и поглощательная способности материалов в зависимости от температуры источника (абсолютно черного тела) падающего излучения:

1 — бумага; 2 — дерево; 3 — материал одежды; 4 — линолеум (красно-коричневый); 5 — штукатурка гипсовая; 6 — красный кирпич; 7 — шиферные плиты; 8 — кафель белый; 9 — керамическая плитка; 10 — бетон

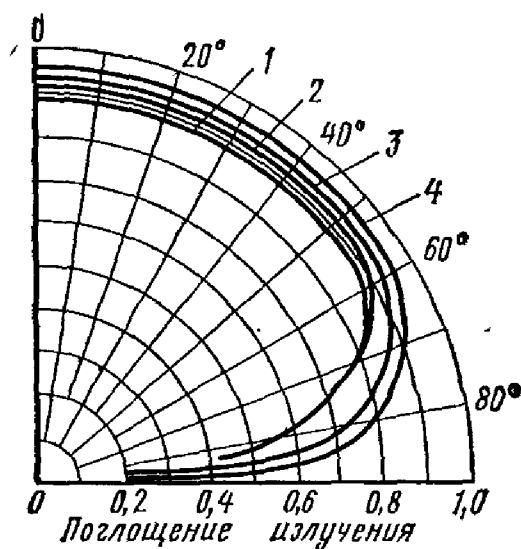
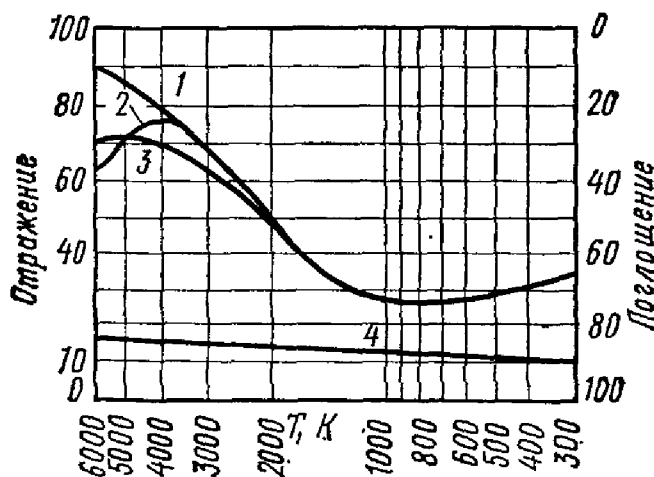
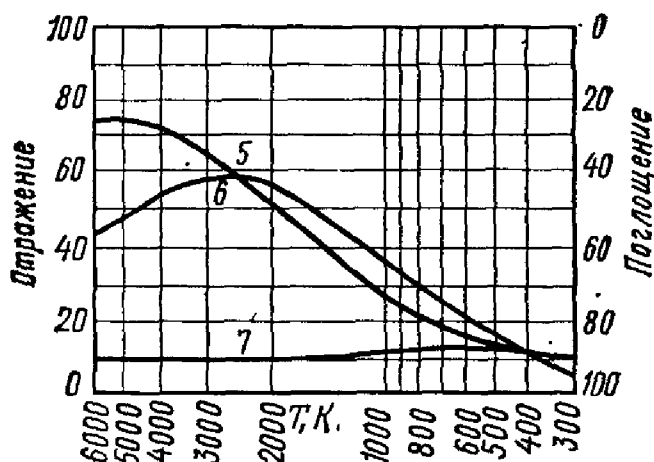


Рис. 1.7. Относительная поглощательная способность в зависимости от угла направления излучения относительно нормали к поверхности:

1 — глина; 2 — стекло; 3 — бумага; 4 — древесина

ного излучения. В то же время в соответствии с законом Кирхгофа, согласно которому коэффициенты излучения и поглощения монохроматического излучения поверхностью материалов равны, первые излучают меньше тепловой энергии, чем вторые. Коэффициент излучения поверхности серого тела S всегда меньше S_0 . Между ними существует зависимость

$$S = \epsilon S_0, \quad (1.4)$$

где ϵ — степень черноты, или относительный коэффициент излучения поверхности (величина безразмерная); для серой поверхности $\epsilon < 1$.

Интенсивность интегрального излучения серой поверхности I в помещении равна

$$E_1 = \varepsilon_1 E_{0,1} = \varepsilon_1 C_0 (T_1/100)^4. \quad (1.5)$$

Таблица 1.1

Значения относительного коэффициента излучения ε (при температурах 0—150°C) и относительного коэффициента поглощении солнечной радиации ρ (при температуре около 6000°C) поверхностями различных строительных материалов

Наименование материала и состояние поверхности	ε	ρ
Мрамор шлифованный:		
серый	0,93	0,30
темный	0,93	0,65
Гранит серый светлый полированный	0,42	0,80
Известняк шлифованный:		
светлый	0,40	0,35
темный	0,40	0,50
Песчаник шлифованный:		
желто-коричневый	—	0,54
светлый	—	0,62
красный	0,57	0,73
Кирпич обыкновенный:		
красный	0,93	0,70—0,74
светло-коричневый	—	0,55
глазурованный белый	—	0,26
Бетон, гладкая поверхность	0,62	0,54—0,65
Штукатурка:		
светлая	0,91	0,42
темная	0,94	0,73
Дерево:		
неокрашенное	0,7—0,9	0,59
окрашенное светло-желтое	—	0,60
Асбест белый	0,96	0,42
Руберонд	0,93	0,76—0,94
Толь черный	0,91	0,86—0,88
Железо:		
полированное	0,128	0,45
оцинкованное	0,28	0,64
Асбоцемент белый	0,96	0,61
Алюминий:		
матовый	0,055	0,52
полированный	0,039—0,057	0,26
Краски масляные:		
кармин светлый, красный		0,52
ультрамарин (синий)		0,64
кобальт зеленый светлый		0,58
марс коричневый	0,81	0,65
кобальт фиолетовый		0,83
зелень изумрудная		0,61
охра золотистая		0,44
охра красная		0,63
Стекло оконное, $\delta = 4,5$ мм		0,04
То же, $\delta = 7$ мм	0,94	0,076

Свойства поглощения и отражения зависят не только от вида материала, но и от состояния поверхности, ее температуры, длин волн излучения и угла направления излучения к поверхности. На рис. 1.6 приведен график зависимости относительных коэффициентов поглощения и отражения некоторых материалов от температуры источника падающего излучения.

На рис. 1.7 показаны частные значения относительного коэффициента излучения в зависимости от угла направления излучения к поверхности. Графики на рис. 1.7 подтверждают фактические отклонения от **закона Ламберта**, согласно которому распределение интенсивности излучения пропорционально косинусу угла падения излучения. Для поверхностей строительных материалов эти отклонения невелики. Излучение металлов сильнее под большим углом к поверхности (исключая углы, близкие к 90°); для диэлектриков имеет место обратное явление.

В узком диапазоне длин волн для интегрального излучения можно принимать, что осредненные значения коэффициентов излучения и поглощения поверхностей в помещении равны между собой. Их значения ϵ применительно к условиям теплообмена в помещении в диапазоне температур $0 - 150^\circ\text{C}$ приведены в табл. 1.1. Там же даны значения коэффициентов поглощения материалами солнечной радиации (при температуре излучения около 6000°C). Таким образом, довольно сложные свойства полихроматического излучения тел можно значительно упростить применительно к рассматриваемой задаче.

Суммируя изложенное выше, тепловое излучение поверхностей в помещении в дальнейшем будем рассматривать как *инфракрасное монохроматическое диффузное*, подчиняющееся законам Стефана — Больцмана, Ламберта и Кирхгофа — излучение поверхностей серых тел.

Воздух помещения при расчете лучистого теплообмена между поверхностями можно считать лучепрозрачной средой. Он состоит в основном из двухатомных газов (азот, кислород), которые совершенно прозрачны для тепловых лучей и сами не излучают тепловой энергии. Незначительное содержание многоатомных газов (водяной пар и углекислота) при малых толщинах слоя воздуха в помещении практически не изменяет этого свойства.

Лекция № 4.

ТЕПЛОБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПОМЕЩЕНИЯ

Каждая поверхность отдает тепло излучением и поглощает лучистое тепло, приходящее от окружающих поверхностей. Нагретые поверхности теряют больше тепла, чем поглощают. Более холодные, наоборот, получают больше тепла,

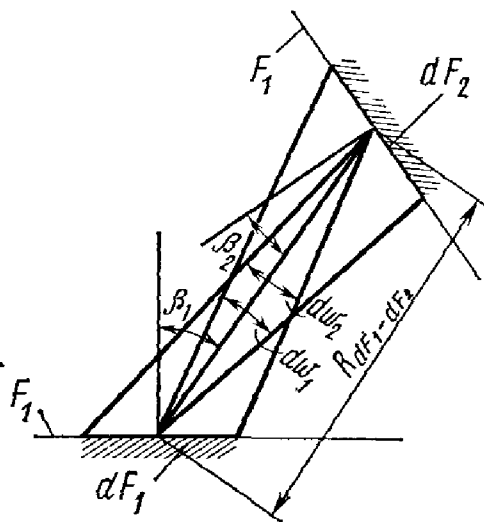


Рис. 1.8. Теплообмен излучением между двумя поверхностями

чем отдают. Между различно нагретыми поверхностями в результате происходит теплообмен излучением.

Рассмотрим в начале теплообмен излучением между двумя абсолютно черными поверхностями 1 и 2 (рис. I.8). В соответствии с законом Стефана — Больцмана, элементарная площадка dF_1 на поверхности 1 излучает во все направления в пределах полусферы количество тепла, равное

$$dq_1 = C_0 (T_1/100)^4 dF_1. \quad (I.6)$$

Интенсивность излучения в направлении, нормальном к поверхности dF_1 , в π раз меньше dq_1 , т. е.

$$dq_{\text{нор}} = \frac{dq_1}{\pi} = \frac{1}{\pi} C_0 (T_1/100)^4 dF_1. \quad (I.7)$$

Интенсивность излучения под углом β_1 к нормали (в направлении к элементарной площадке dF_2) равна

$$dq_{\beta_1} = \frac{1}{\pi} C_0 (T_1/100)^4 \cos \beta_1 dF_1. \quad (I.8)$$

В пределах телесного угла $d\omega_1$ излучение тепла равно

$$d^2q_1 = \frac{1}{\pi} C_0 (T_1/100)^4 \cos \beta_1 dF_1 d\omega_1. \quad (I.9)$$

Телесный угол $d\omega_1$, определяемый dF_2 , равен

$$d\omega_1 = \frac{dF_2 \cos \beta_2}{R^2}, \quad (I.10)$$

где $dF_2 \cos \beta_2$ — проекция площадки dF_2 на сферу радиусом R с центром в dF_1 , когда угол между направлением излучения и нормалью к поверхности dF_2 равен β_2 ; R — расстояние между элементарными площадками dF_1 и dF_2 .

Уравнение (I.9) можно записать в виде

$$d^2q_1 = C_0 (T_1/100)^4 \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi R^2} dF_1 dF_2. \quad (I.11)$$

Уравнение, аналогичное (I.11), может быть написано для потока тепла d^2q_2 , передаваемого площадкой dF_2 в сторону dF_1 . Предполагается, что поверхности абсолютно черные, поэтому все тепло излучения ими поглощается. В результате лучистого теплообмена от площадки dF_1 передается площадке dF_2 количество тепла, равное

$$d^2Q_{1-2} = d^2q_1 - d^2q_2 = C_0 \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi R^2} dF_1 dF_2 \times [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]. \quad (I.12)$$

Удобно воспользоваться понятием коэффициента облученности ϕ , который является геометрической характеристикой. Коэффициент облученности с площадки dF_1 на площадку dF_2 обозначим $\phi_{dF_1-dF_2}$.

Он равен отношению лучистого потока, падающего с dF_1 на dF_2 , ко всему потоку, излучаемому dF_1 (1.6), т. е.

$$\varphi_{dF_1-dF_2} = \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi R^2} dF_2. \quad (1.13)$$

Подставим это значение в (1.12) и получим

$$d^2Q_{1-2} = C_0 \varphi_{dF_1-dF_2} dF_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]. \quad (1.14)$$

Теплообмен излучением между двумя поверхностями 1 и 2, полные площади которых равны F_1 и F_2 , можно получить двойным интегрированием уравнения (1.14) по площадям F_1 и F_2 . Первое интегрирование дает значение количества тепла, теряемого с элементарной площадки dF_1 в сторону всей площади F_2 :

$$dQ_{1-2} = C_0 \varphi_{dF_1-2} dF_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4], \quad (1.15)$$

где φ_{dF_1-2} — коэффициент облученности с элементарной площадки dF_1 на всю поверхность 2, равный

$$\varphi_{dF_1-2} = \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi R^2} dF_2. \quad (1.16)$$

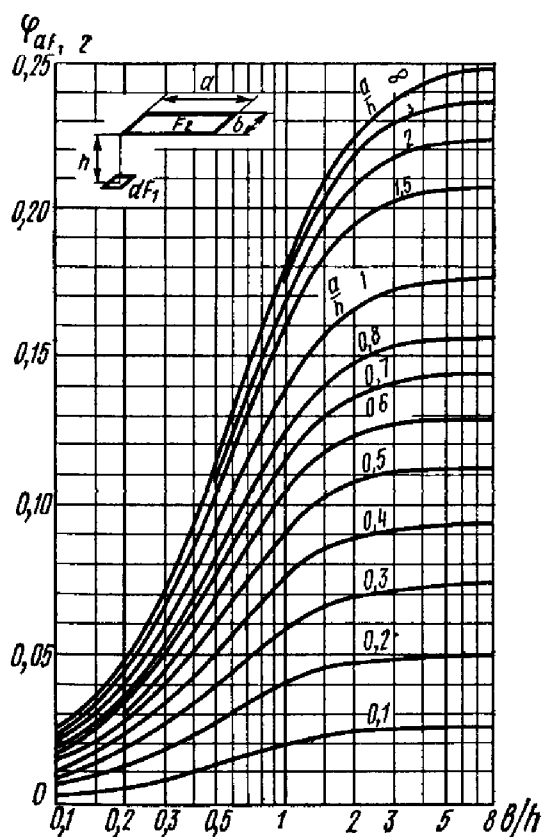


Рис. 1.9. Коэффициент облученности с элементарной площадки на поверхность в параллельной плоскости

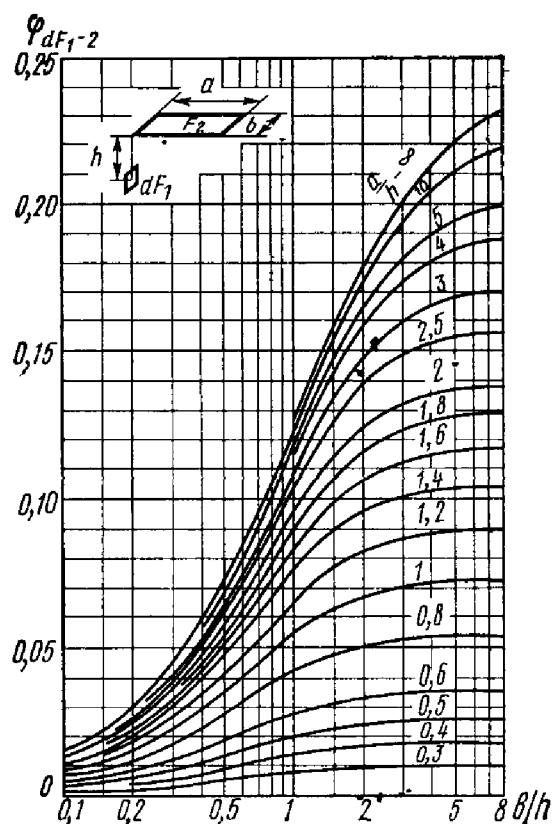


Рис. 1.10. Коэффициент облученности с элементарной площадки на поверхность в перпендикулярной плоскости

Для определения коэффициента облученности с элементарной площадки на поверхность для двух наиболее характерных случаев расположения поверхностей во взаимно перпендикулярных и параллельных плоскостях можно воспользоваться графиками (рис. I.9 и I.10). Второе интегрирование определит общее количество тепла Q_{1-2} , передаваемое излучением с поверхности 1 на поверхность 2:

$$Q_{1-2} = C_0 \varphi_{1-2} F_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4], \quad (I.17)$$

где коэффициент облученности φ_{1-2} с поверхности 1 на поверхность 2, равный

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi R^2} dF_1 dF_2, \quad (I.18)$$

показывает долю лучистого потока, попадающую на поверхность 2, от всего потока, излучаемого поверхностью 1.

Для определения коэффициента облученности φ_{1-2} при двух наиболее характерных случаях расположения поверхностей в помещении пользуются графиками (рис. I.11 и I.12). Для определения коэффициента облученности с точечной сферы на поверхности любого расположения можно воспользоваться рис. I.13.

Поверхности в помещении отличаются от абсолютно черных, что осложняет задачу, так как падающая на серую поверхность лучистая энергия частично отражается. Некоторая ее часть может многократно отражаться от взаимно облучаемых серых поверхностей, пока полностью ими не поглотится. Из теории лучистого теплообмена известно, что при теплообмене монохроматическим излучением двух серых поверхностей, для которых справедливы законы Ламберта и Кирхгофа, количество переданного тепла Q_{1-2} определяется по формуле

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{\text{пр } 1-2} C_0 \varphi_{1-2} F_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]. \quad (I.19)$$

В этой формуле в отличие от (I.17) величина $\varepsilon_{\text{пр } 1-2}$ есть приведенный относительный коэффициент излучения при теплообмене между двумя серыми поверхностями. Для определения $\varepsilon_{\text{пр}}$ можно рассмотреть три простейших случая.

1. Для двух параллельных поверхностей, расстояние между которыми мало по сравнению с их размерами (коэффициент облученности $\varphi_{1-2} = 1$, так как практически все излучение одной поверхности попадает на другую). Отраженные лучи полностью возвращаются на излучающую поверхность и так до полного поглощения. Приведенный относительный коэффициент излучения теплообменивающихся поверхностей для этого случая равен

$$\varepsilon_{\text{пр } 1-2} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}, \quad (I.20)$$

где ε_1 и ε_2 — относительные коэффициенты излучения поверхностей.

2. Поверхность со всех сторон окружена другой поверхностью. Это сфера в сфере, цилиндр в цилиндре или просто невогнутая поверхность, окруженная большей поверхностью такой же геометрии. В этом

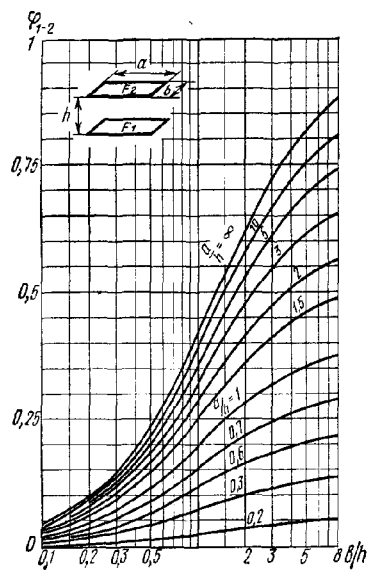


Рис. 1.11. Коэффициент облученности с поверхности на поверхность, расположенную в параллельной плоскости

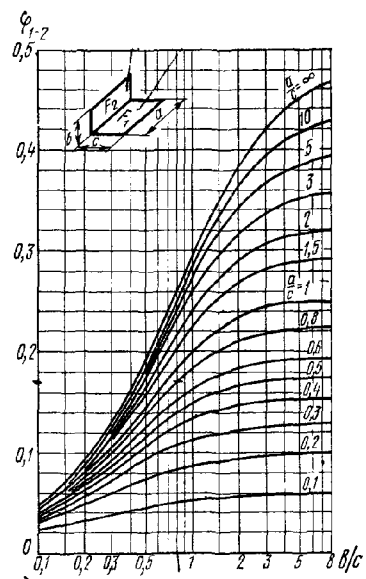


Рис. 1.12. Коэффициент облученности с поверхности на поверхность, расположенную в перпендикулярной плоскости

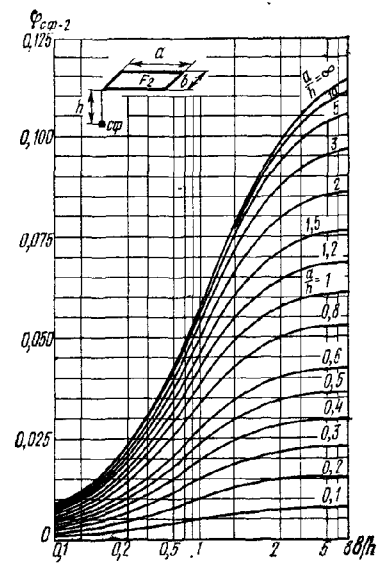


Рис. 1.13. Коэффициент облученности с точечной сферы на поверхность

случае, если меньшая поверхность имеет площадь F_1 , а большая F_2 , величина $\epsilon_{\text{пр}1-2}$ равна

$$\epsilon_{\text{пр}1-2} = \frac{1}{1/\epsilon_1 + F_1/F_2 (1/\epsilon_2 - 1)} \quad (1.21)$$

3. Если поверхности малы или велико расстояние между ними, то часть отраженного излучения, возвращающаяся на излучающую поверхность, становится пренебрежимой. В этом случае

$$\epsilon_{\text{пр}1-2} = \epsilon_1 \epsilon_2 \quad (1.22)$$

Формула (1.22) определяет наинизший предел значения $\epsilon_{\text{пр}1-2}$. Наибольшее значение $\epsilon_{\text{пр}1-2} = \epsilon_1$ соответствует второму случаю (1.21)

при $F_1/F_2 \rightarrow 0$. Формула (1.20) дает среднее между этими крайними пределами значение $\epsilon_{\text{пр}}$. При произвольном расположении поверхностей точно определить $\epsilon_{\text{пр}}$ сложно. Величина $\epsilon_{\text{пр}}$ будет находиться между значениями, определенными формулами (1.20) и (1.22). Поверхности в помещении имеют большие значения коэффициентов излучения. Для них разница при определении $\epsilon_{\text{пр}}$ по формулам (1.20) и (1.22) невелика. На рис. 1.14 приведены графики значений $\epsilon_{\text{пр}}$, построенные по этим формулам.

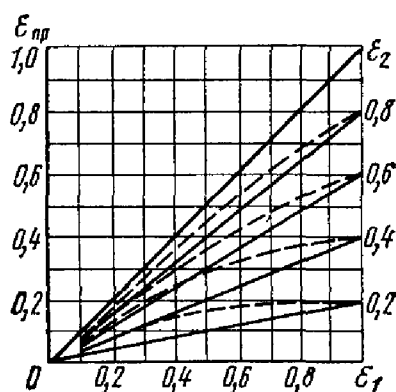


Рис. 1.14. Приведенные коэффициенты излучения:

— по формуле (1.22);
- - - по формуле (1.20)

Угловые коэффициенты облученности практически для всех возможных случаев взаимного расположения поверхностей в помещении могут быть определены с помощью графиков рис. 1.9—1.13 и по формулам табл. 1.2 Эти формулы

выведены на основе свойств лучистых потоков [1.21]. *Лучистым потоком* в данном случае называется *геометрическая характеристика*, равная произведению площади излучающей поверхности на коэффициент облученности с этой поверхности на другую, лучистый поток на которую определяется.

При определении коэффициентов облученности пользуются тремя основными свойствами лучистых потоков.

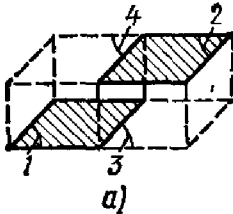
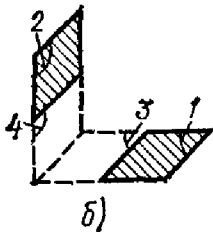
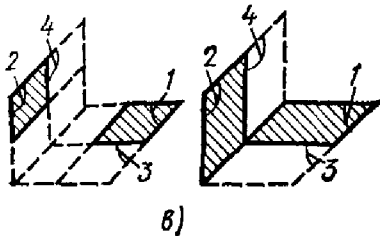
Свойство замкнутости лучистых потоков состоит в том, что сумма коэффициентов облученности с поверхности I в сторону всех окружающих поверхностей j равна единице:

$$\sum \Phi_{I-j} = 1. \quad (1.23)$$

Свойство замкнутости лучистых потоков позволяет, например, проверить правильность определения всех коэффициентов облученности с одной поверхности в помещении в сторону всех остальных поверхностей. Уравнение (1.23) не удовлетворяется, например, в случае, если поверхность I является вогнутой, так как при наличии вогнутости часть лучей попадает на саму поверхность и в лучистом обмене с окружающими поверхностями не участвует.

Таблица 1.2

Расчетные формулы коэффициентов облученности при различном расположении поверхностей в помещении
(в дополнение к графикам рис. 1.11 — 1.12)

Расположение поверхностей	Значение коэффициента облученности
 <p>а)</p>	$\varphi_{1-2} = \frac{1}{2F_1} \left[\varphi_{(1+3)-(2+4)} (F_1 + F_3) - \varphi_{1-4} F_4 - \varphi_{3-2} F_3 \right]$
 <p>б)</p>	$\varphi_{1-2} = \frac{1}{F_1} \left[\varphi_{(1+3)-(2+4)} (F_1 + F_3) - \varphi_{3-(2+4)} F_3 - \varphi_{(1+3)-4} (F_1 + F_3) - \varphi_{3-4} F_3 \right]$
 <p>в)</p>	$\varphi_{1-2} = \frac{1}{2F_1} \left[\varphi_{(1+3)-(2+4)} (F_1 + F_3) - \varphi_{1-4} F_4 - \varphi_{3-2} F_3 \right]$

Свойство взаимности лучистых потоков. Согласно этому свойству поток с поверхности 1 на поверхность 2 равен потоку с поверхности 2 на 1:

$$F_1 \varphi_{1-2} = F_2 \varphi_{2-1}. \quad (I.24)$$

Пользуясь этим соотношением, можно, например, при известном значении φ_{2-1} получить коэффициент облученности:

$$\varphi_{1-2} = \varphi_{2-1} F_2 / F_1. \quad (I.25)$$

Свойство распределительности лучистых потоков состоит в том, что поток от поверхности 1 к поверхности 2 может быть представлен в виде суммы потоков между отдельными частями m (1) и n (2) этих поверхностей

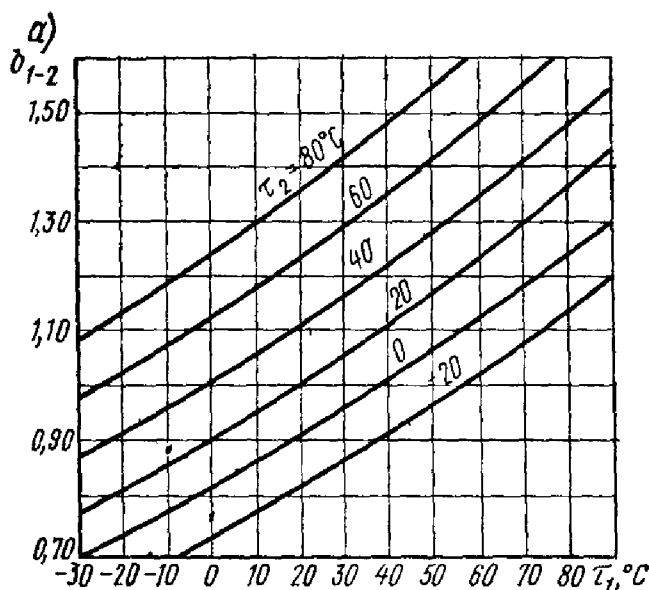
$$F_1 \varphi_{1-2} = \sum_m \sum_n F_m \varphi_{m-n}. \quad (I.26)$$

Зависимость (I.26) позволяет по данным для простейших схем расположения поверхностей получить значения коэффициентов облученности при произвольном положении поверхностей.

В табл. I.2 приведены рисунки и формулы для расчета средних коэффициентов облученности при различных вариантах возможного расположения нагретых и охлажденных поверхностей в помещении.

Для инженерных расчетов в формуле (I.19) удобно заменить разность четвертых степеней абсолютных температур разностью температур в первой степени в виде

$$(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 = b_{1-2} (\tau_1 - \tau_2). \quad (I.27)$$



Множитель b_{1-2} (рис. I.15, а), корректирующий расхождение между этими двумя разностями температур, называют температурным коэффициентом. Его величину при комнатных температурах можно

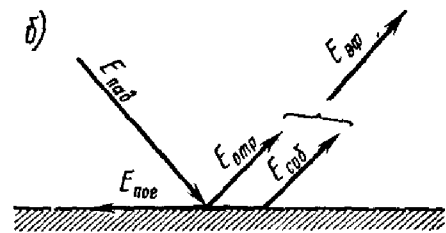


Рис. I.15. К выводу формулы лучистого теплообмена поверхностей в помещении:

а — зависимость температурного коэффициента b от температуры теплообменивающихся поверхностей; б — структура лучистых потоков на поверхности серого тела

определять, исходя из средней температуры теплообменивающихся поверхностей $\tau_{\text{ср}} = 0,5(\tau_1 + \tau_2)$ по формуле

$$b_{1-2} = 0,81 + 0,01 \tau_{\text{ср}}. \quad (I.28)$$

С учетом всех изложенных упрощений количество тепла Q_{1-2} (I.19) может быть определено по формуле

$$Q_{1-2} = C_0 \varepsilon_{\text{пр } 1-2} b_{1-2} (\tau_1 - \tau_2) \varphi_{1-2} F_1. \quad (I.29)$$

Эта формула получена из рассмотрения теплообмена только двух поверхностей между собой без учета излучения и участия в многократном отражении остальных поверхностей. Для точного расчета лучистого теплообмена тела со всеми окружающими его поверхностями в помещении нужно воспользоваться методикой, использующей понятие «эффективное излучение».

Общий поток лучистого тепла, покидающий поверхность, называется ее э ф ф е к т и в н ы м излучением $E_{эф}$. Этот поток складывается из потоков собственного $E_{соб}$ и отраженного $E_{отр}$ излучений. Лучистый поток, приходящий на поверхность, называется *падающим* $E_{пад}$. Он складывается из частей потоков эффективного излучения всех окружающих поверхностей. Часть его остается на поверхности и является поглощенным $E_{погл}$ излучением. Структура лучистых потоков на поверхности серого тела приведена на рис. 1.15, б.

Баланс лучистого теплообмена \mathcal{L}_1 (1.1) поверхности 1 в помещении со всеми поверхностями определяется равенством

$$\mathcal{L}_1 = E_{погл} = (E_{эф1} - E_{пад1}) F_1. \quad (1.30)$$

Эффективное излучение поверхности 1 равно сумме собственного $E_{соб1}$ и отраженного $E_{отр1}$ излучений:

$$E_{эф1} = E_{соб1} + E_{отр1} = \varepsilon_1 C_0 (T_1/100)^4 + (1 - \varepsilon_1) E_{пад1}. \quad (1.31)$$

Теплообмен излучением поверхности 1 с остальными поверхностями помещения можно представить в следующем виде. Количество тепла, уходящее с поверхности 1, определяется как $\sum_j F_{1\varphi_{1-j}} E_{эф1}$. Количество тепла, падающее на поверхность 1, равно $\sum_j F_{j\varphi_{j-1}} E_{эфj}$. С учетом свойств взаимности лучистых потоков, когда $F_{j\varphi_{j-1}} = F_{1\varphi_{1-j}}$, имеем

$$\sum_j F_{1\varphi_{1-j}} E_{эф1} = \sum_j F_{1\varphi_{1-j}} E_{эфj}.$$

Баланс лучистого теплообмена поверхности 1 в связи с этим можно записать согласно (1.30) в виде

$$\mathcal{L}_1 = \sum_j F_{1\varphi_{1-j}} (E_{эф1} - E_{эфj}). \quad (1.32)$$

Совместное решение уравнений (1.30) и (1.31) позволяет установить связь между $E_{о1}$ (излучение абсолютно черного тела при температуре поверхности 1) и эффективным $E_{эф1}$ излучениями поверхности и записать баланс лучистого теплообмена на ней также в виде

$$\mathcal{L}_1 = F_1 \frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} (E_{о1} - E_{эф1}). \quad (1.33)$$

Таким образом, свойство излучения серой поверхности определяется двумя потоками излучения $E_{о1}$ и $E_{эф1}$, а ее баланс лучистого теплообмена — двумя уравнениями (1.32) и (1.33).

Введем в рассмотрение условное понятие «эффективная температура ($T_{эф}$) поверхности». По аналогии с зависимостью между излучением $E_{о1}$ поверхности и ее температурой T_1

$$E_{о1} = C_0 (T_1/100)^4 \quad (1.34)$$

зависимость между эффективным излучением поверхности $E_{эф1}$ и ее эффективной температурой $T_{эф1}$ будет иметь вид

$$E_{эф1} = C_0 (T_{эф1}/100)^4. \quad (1.35)$$

Уравнения баланса лучистого теплообмена поверхности удобно записать относительно разности температур. Уравнение (I.32) примет вид

$$L_1 = \sum F_{1-j} C_0 b_{\text{эф } 1-\text{эф } j} (\tau_{\text{эф } 1} - \tau_{\text{эф } j}), \quad (\text{I.36})$$

а уравнение (I.33)

$$L_1 = F_1 \frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} C_0 b_{1-\text{эф } j} (\tau_1 - \tau_{\text{эф } j}), \quad (\text{I.37})$$

τ и $\tau_{\text{эф}}$ — соответствующие температуры и эффективные температуры поверхности 1 и окружающих ее поверхностей, К ($^{\circ}\text{C}$); b — температурный коэффициент, учитывающий в уравнениях (I.36) и (I.37) переход от разности четвертых степеней абсолютных температур в К к разности температур в $^{\circ}\text{C}$.

Задача о лучистом теплообмене системы серых поверхностей в такой постановке может быть представлена в виде системы уравнений баланса лучистого теплообмена, причем для каждой поверхности таких уравнений будет два вида: (I.36) и (I.37). Решение задачи можно получить с помощью аналоговой электрической модели или расчетом на ЭВМ (см. § 1.17).

Для инженерного расчета теплообмена в случае, когда поверхности имеют высокие значения коэффициента излучения, можно упростить постановку задачи, пренебрегая отраженным вторичным излучением. Обычно для ограждений в помещении степень черноты больше 0,9, поэтому отраженное вторичное излучение составляет небольшую величину от падающего потока и значительно меньше собственного излучения. Если поверхности имеют небольшой коэффициент черноты, то уменьшается доля лучистого теплообмена в общем обмене теплом и поэтому увеличение ошибки в расчете лучистой составляющей практически не изменяет точности общего результата. Расчеты по точным формулам показывают, что пренебрежение многократным отражением применительно к условиям в помещении дает небольшую погрешность (менее 3%), вполне допустимую в инженерных расчетах. Приняв такое упрощение, можно определить радиационный баланс поверхности 1 в помещении с учетом теплообмена со всеми поверхностями формулой

$$L_1 = \sum_j C_0 \varepsilon_{1-j} b_{1-j} (\tau_1 - \tau_j) \varphi_{1-j} F_1. \quad (\text{I.38})$$

При расчете должны быть учтены все поверхности, а в некоторых случаях и характерные их части, участвующие в лучистом теплообмене с поверхностью 1 . Число поверхностей и их частей будет соответствовать числу слагаемых в сумме правой части написанного уравнения и может быть достаточно велико, что затрудняет расчет. В связи с этим для последующего упрощения расчета лучистого теплообмена поверхности в помещении удобно воспользоваться понятием *радиационная температура t_R помещения*. Температура t_{R1} — радиационная температура помещения, относительно повер-

ности l определяется как осредненная (по признаку эквивалентности лучистому теплообмену с поверхностью l) температура всех окружающих (поверхность l) поверхностей в помещении. Признак эквивалентности лучистому теплообмену достаточно полно отражает коэффициент облученности (I.38). Поэтому t_{R1} определим как осредненную температуру поверхностей по коэффициентам облученности

$$t_{R1} = \frac{\sum \varphi_{1-j} t_j}{\sum \varphi_{1-j}}. \quad (I.39)$$

Знаменатель последней формулы по свойству замкнутости лучистых потоков (I.23) обычно равен единице, поэтому

$$t_{R1} = \sum \varphi_{1-j} t_j. \quad (I.40)$$

Иногда t_{R1} определяют как средневзвешенную температуру по площадям окружающих поверхностей, т. е.

$$t_{R1} = \frac{\sum F_j t_j}{\sum F_j}. \quad (I.41)$$

Расчет по (I.41) проще, чем по (I.39), но менее точен.

Пользуясь понятием «радиационная температура», можно еще более упростить расчет лучистого теплообмена в помещении и записать формулу (I.38) в виде

$$J_1 = C_0 \varepsilon_{\text{пр } 1-R} b_{1-R} \varphi_{1-R} (\tau_1 - t_R) F_1. \quad (I.42)$$

Произведение величин перед разностью температур в последней формуле по физическому смыслу является коэффициентом лучистого теплообмена поверхности l в помещении ($\alpha_{л1}$). Он равен

$$\alpha_{л1} = C_0 \varepsilon_{\text{пр } 1-R} b_{1-R} \varphi_{1-R}. \quad (I.43)$$

С учетом $\alpha_{л1}$ уравнение лучистого теплообмена произвольной поверхности l в помещении запишем в виде

$$J_1 = \alpha_{л1} (\tau_1 - t_R) F_1. \quad (I.44)$$

В помещении обычно все поверхности имеют $\varepsilon \approx 0,9 \div 0,95$ и $\varepsilon_{\text{пр } 1-R} \approx 0,85$, $b_{1-R} \approx 1,0$, $\varphi_{1-R} = 1,0$, $C_0 = 5,77$, поэтому

$$\alpha_{л1} \approx 5,77 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 1 = 4,9 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} [4,2 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С)}].$$

Это значение $\alpha_{л1}$ обычно и принимается в инженерных расчетах лучистого теплообмена в помещении.

Пример I.1. Определить количество тепла, передаваемого непосредственно от нагретой перегородочной панели к окну путем излучения. Температура панели $\tau_{\text{п}} = 40^\circ \text{С}$, температура стекла $\tau_{\text{ок}} = 5^\circ \text{С}$. Расположение панели относительно окна показано на рис. I.16, а.

Решение. По формуле (I.19) количество передаваемого тепла равно

$$Q_{\text{п-ок}} = C_0 \varepsilon_{\text{пр } \text{п-ок}} F_{\text{п}} [(T_{\text{п}}/100)^4 - (T_{\text{ок}}/100)^4].$$

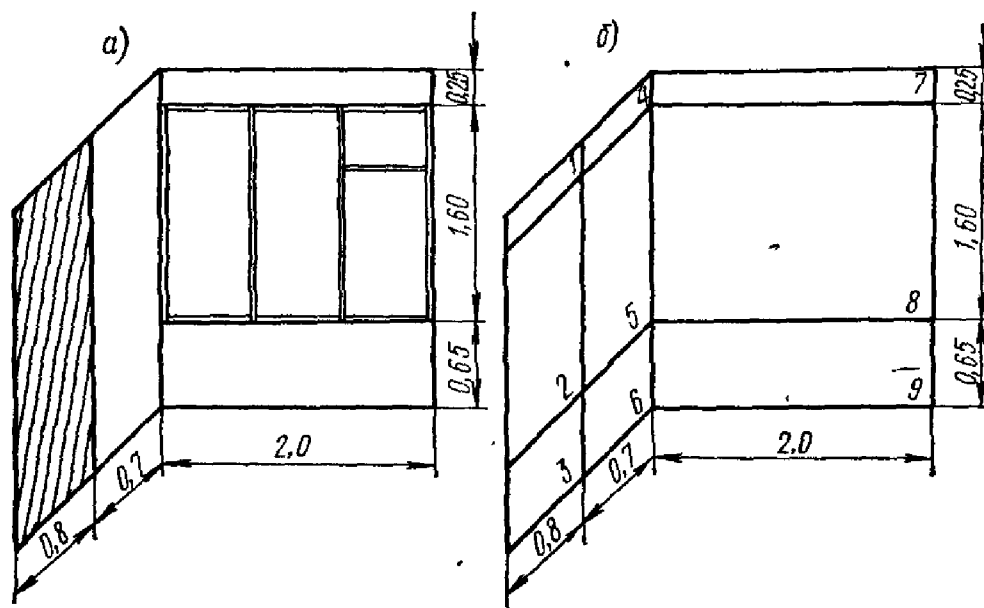


Рис. 1.16. К примеру 1.1 расчета лучистого теплообмена между нагретой перегородочной панелью и окном

Приведенный коэффициент излучения $\epsilon_{\text{пр}}$ для данной системы тел (панель - окно) можно определить, воспользовавшись формулой (1.22):

$$\epsilon_{\text{пр}} = 0,91 \cdot 0,94 = 0,86,$$

где 0,94 — коэффициент излучения стекла; 0,91 — коэффициент излучения штукатурки (см. табл. 1.1).

Для определения коэффициента облученности разобьем поверхности перегородки и наружной стены на характерные прямоугольники (рис. 1.16, б). Согласно свойству распределительности лучистых потоков (1.26),

$$\varphi_{8-(1+2+3)} F_8 = \varphi_{8-1} F_8 + \varphi_{8-2} F_8 + \varphi_{8-3} F_8$$

или

$$\varphi_{8-(1+2+3)} = \varphi_{8-1} + \varphi_{8-2} + \varphi_{8-3};$$

$$\varphi_{8-1} = \varphi_{8-(1+4)} - \varphi_{8-4}; \quad \varphi_{8-2} = \varphi_{8-(2+5)} - \varphi_{8-5}; \quad \varphi_{8-3} = \varphi_{8-(3+6)} - \varphi_{8-6}.$$

По табл. 1.2,

$$\varphi_{8-(1+4)} = \frac{1}{2F_8} [\varphi_{(7+8)-(1+4+5)} (F_7 + F_8) - \varphi_{7-(1+4)} F_7 - \varphi_{8-(2+5)} F_8];$$

$$\varphi_{8-4} = \frac{1}{2F_8} [\varphi_{(7+8)-(4+5)} (F_7 + F_8) - \varphi_{7-4} F_7 - \varphi_{8-5} F_8];$$

$$\varphi_{8-(3+6)} = \frac{1}{2F_8} [\varphi_{(8+9)-(2+5+3+6)} (F_8 + F_9) - \varphi_{8-(2+5)} F_8 - \varphi_{9-(3+6)} F_9];$$

$$\varphi_{8-6} = \frac{1}{2F_8} [\varphi_{(8+9)-(3+6)} (F_8 + F_9) - \varphi_{8-5} F_8 - \varphi_{9-6} F_9].$$

Таким образом,

$$\begin{aligned}
\varphi_{8-(1+2+3)} &= \frac{1}{2F_8} [\varphi_{(7+8)-(1+2+4+5)} (F_7 + F_8) - \varphi_{7-(1+4)} F_7 - \varphi_{8-(2+5)} F_8] - \\
&- \frac{1}{2F_8} [\varphi_{(7+8)-(4+5)} (F_7 + F_8) - \varphi_{7-4} F_7 - \varphi_{8-5} F_8] + \varphi_{8-(2+5)} - \varphi_{8-5} + \\
&+ \frac{1}{2F_8} [\varphi_{(8+9)-(2+3+5+6)} (F_8 + F_9) - \varphi_{8-(2+5)} F_8 - \varphi_{9-(3+6)} F_9] - \\
&- \frac{1}{2F_8} [\varphi_{(8+9)-(3+6)} (F_8 + F_9) - \varphi_{8-5} F_8 - \varphi_{9-6} F_9] = \\
&= \frac{1}{2F_8} [\varphi_{(7+8)-(1+2+4+5)} (F_7 + F_8) - \varphi_{7-(1+4)} F_7 - \varphi_{(7+8)-(4+5)} (F_7 + F_8) + \\
&+ \varphi_{7-4} F_7 + \varphi_{(8+9)-(2+5+3+6)} (F_8 + F_9) - \varphi_{9-(3+6)} F_9 - \\
&- \varphi_{(8+9)-(5+6)} (F_8 + F_9) - \varphi_{9-6} F_9]
\end{aligned}$$

Все коэффициенты облученности, входящие в правую часть этого равенства, могут быть определены по рис. 1.12. Например, при $b/c = 1,5/2 = 0,75$, $a/c = 1,85/2 = 0,925$ $\varphi_{(7+8)-(1+2+4+5)} = 0,175$; при $b/c = 1,5/2 = 0,75$, $a/c = 0,125$ $\varphi_{7-(1+4)} = 0,06$.

Все остальные значения коэффициентов облученности, определенные по рис. 1.12, сведены в таблицу.

Обозначение	a/c	b/c	φ
$\varphi_{(7+8)-(4+5)}$	$1,85/2 = 0,925$	$0,7/2 = 0,35$	0,12
φ_{7-4}	$0,25/2 = 0,125$	$0,7/2 = 0,35$	0,05
$\varphi_{(9+8)-(2+3+5+6)}$	$2,25/2 = 1,125$	$1,5/2 = 0,75$	0,19
$\varphi_{9-(3+6)}$	$0,65/2 = 0,325$	$1,5/2 = 0,75$	0,11
$\varphi_{(8+9)-(5+6)}$	$2,25/2 = 1,125$	$0,7/2 = 0,35$	0,12
φ_{9-6}	$0,65/2 = 0,325$	$0,7/2 = 0,35$	0,08

Подставляя определенные значения в выражение для $\varphi_{8-(1+2+3)}$, получим

$$\begin{aligned}
\varphi_{8-(1+2+3)} &= \frac{1}{2(2,0 \cdot 1,6)} \{0,175 [(0,25 \cdot 2,0) + (1,6 \cdot 2,0)] - 0,06 (0,25 \cdot 2,0) - \\
&- 0,12 [(0,25 \cdot 2,0) + (1,6 \cdot 2,0)] + 0,05 (0,25 \cdot 2,0) + 0,19 [(0,65 \cdot 2,0) + \\
&+ (1,6 \cdot 2,0)] - 0,11 (0,65 \cdot 2,0) - 0,12 [(0,65 \cdot 2,0) + (1,6 \cdot 2,0)] + \\
&+ 0,08 (0,65 \cdot 2,0)\} = 0,074.
\end{aligned}$$

Теперь, пользуясь свойством взаимности лучистых потоков (1.25), определим облученность с панели на окно:

$$\varphi_{п-ок} = \varphi_{(1+2+3)-8} = \frac{\varphi_{8-(1+2+3)} F_{ок}}{F_{п}} = \frac{0,08 \cdot 3,2}{2} = 0,118.$$

Таким образом, количество тепла, переданного панелью окну, по формуле (1.19) равно

$$Q_{п-ок} = 0,86 \cdot 5,77 \cdot 0,118 \cdot 2 \left[\left(\frac{273 + 40}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 5}{100} \right)^4 \right] = 42,5 \text{ Вт.}$$

Если же воспользоваться упрощенной формулой (1.38), то

$$\begin{aligned} Q_{п-ок} &= C_0 \epsilon_{пр} b \varphi_{п-ок} F_{п} (\tau_{п} - \tau_{ок}) = \\ &= 5,77 \cdot 0,86 \cdot 1,035 \cdot 0,118 \cdot 2 (40 - 5) = 42,4 \text{ Вт,} \end{aligned}$$

где $\epsilon_{пр} = 0,86$ определено по рис. 1.14 и формуле (1.22) при $\epsilon_1 = 0,91$ и $\epsilon_2 = 0,94$, а $b = 1,035$ — по графику рис. 1.15, а и формуле (1.28).

Можно определить количество тепла, переданного от панели окну, по формуле (1.19), переписав ее в виде

$$Q_{п-ок} = \epsilon_{пр} F_{п} \varphi_{п-ок} \left[C_0 \left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 - C_0 \left(\frac{T_{ок}}{100} \right)^4 \right] = \epsilon_{пр} \varphi_{п-ок} F_{п} [E_{0,п} - E_{0,ок}].$$

Значения слагаемых в квадратных скобках определяем по графику рис. 1.5, тогда

$$Q_{п-ок} = 0,86 \cdot 2 \cdot 0,118 (554 - 345) = 42,4 \text{ Вт.}$$

Как видно, расчет по приближенной формуле и графикам дает удовлетворительное совпадение с расчетом по формуле (1.19).

Москва. 2009 год.