Отсюда

$$q = Q/(F\tau) = \Delta t / \sum_{i=1}^{i=n} (\delta_i/\lambda_i),$$

или

$$Q = (t_{ст.1} - t_{ст.2})F\tau / \sum_{i=1}^{i=n} (\delta_i/\lambda_i). \qquad (11.13)$$

Из выражения (11.13) следует, что для многослойной стенки общее термическое сопротивление равно сумме термических сопротивлений отдельных слоев.

Уравнение теплопроводности цилиндрической стенки. Полагаем, что $t_{ст.1} > t_{ст.2}$ (рис. 11-2), коэффициент теплопроводности не зависит от температуры, которая изменяется только в радиальном направлении. Для вывода уравнения теплопроводности цилиндрической стенки целесообразно перейти к цилиндрическим координатам. При этом уравнение Фурье для установившегося процесса теплообмена примет вид

$$Q = -\lambda F\tau \partial t/\partial r, \qquad (11.14)$$

где $F = 2\pi rL$ - площадь поверхности цилиндрической стенки текущим радиусом r.

С учетом одномерности температурного поля уравнение (11.14) можно записать так:

$$Q = -\lambda 2\pi rL\tau \mathrm{d}t/\mathrm{d}r.$$

Разделим переменные:

$$\mathrm{d}r/r = -\lambda 2\pi L\tau \mathrm{d}t/Q.$$

Интегрируем последнее уравнение в пределах от r_1 до r_2 и от $t_{ст.1}$ до $t_{ст.2}$:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\mathrm{d}r}{r} = -\frac{2\pi L\lambda\tau}{Q} \int_{t_{ст.1}}^{t_{ст.2}} \mathrm{d}t,$$

откуда

$$Q = \frac{2\pi L(t_{ст.1} - t_{ст.2})\tau}{(1/\lambda)\ln(r_2/r_1)}. \qquad (11.15)$$

Уравнение (11.15) называют *уравнением теплопроводности цилиндрической стенки при установившемся процессе теплопереноса.* Из этого уравнения следует, что по толщине цилиндрической стенки температура изменяется по криволинейному (логарифмическому) закону.

В том случае, когда отношение $r_2/r_1 < 2$ (что характерно, например, для обычных металлических труб, из которых формируются теплообменники), уравнение (11.15) может быть без заметной ошибки заменено уравнением теплопроводности плоской стенки.

Для многослойной цилиндрической стенки по аналогии с уравнением для многослойной плоской стенки получим:

$$Q = \frac{2\pi L(t_{\text{ст} 1} - t_{\text{ст}.2})}{\sum\limits_{i=1}^{i=n} (1/\lambda_i)\ln(r_{i+1}/r_i)}, \tag{11.16}$$

где i - порядковый номер слоя стенки.

11.3. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Во всех телах, температура которых выше 0 K, происходит превращение тепловой энергии в лучистую. Носителями лучистой энергии являются электромагнитные колебания с различными длинами волн. Возникновение потока лучей в результате превращения тепловой энергии в лучистую называют *излучением*. По физической сущности *тепловое излучение* аналогично излучению света и следует одним и тем же законам отражения, преломления и поглощения, отличаясь лишь длиной волны. Длина видимых (световых) волн составляет величину 0,4–0,8 мкм, а тепловых (инфракрасных) – 0,8–800 мкм. Твердые тела обладают *сплошным спектром* излучения. Поэтому они испускают волны всех длин при любой температуре.

Когда поток излучения $Q_\text{и}$ из окружающей среды попадает на какое-либо тело (рис. 11-3), то в общем случае часть этого потока Q_R отражается от тела, часть Q_A поглощается телом и часть Q_D проходит через тело. Тогда уравнение баланса энергии в общем виде запишется как

$$Q_\text{и} = Q_R + Q_A + Q_D, \tag{11.17}$$

а в долях от общей энергии излучения – как

$$Q_R/Q_\text{и} + Q_A/Q_\text{и} + Q_D/Q_\text{и} = R + A + D = 1. \tag{11.18}$$

Если $A = 1$ (соответственно $R = D = 0$), это означает, что тело полностью поглощает все падающие на него лучи. Такое тело называют *абсолютно черным*. Наиболее близки к абсолютно черному телу технический углерод (сажа), который поглощает до 96% всех лучей, или полая сфера с небольшим отверстием, стенки которой имеют большую поглощательную способность.

При $R = 1$ (соответственно $A = D = 0$) тело отражает все падающие на него лучи. Такое тело называют *абсолютно белым*.

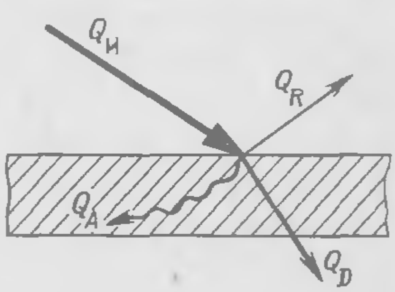

Рис. 11-3. К балансу энергии излучения