Установившиеся процессы соответствуют непрерывной работе аппаратов с постоянным режимом (гидродинамическим и тепловым, т.е. температурным). Неустановившиеся процессы имеют место в аппаратах периодического действия, а также при пуске, остановке и изменении режимов работы аппаратов непрерывного действия.

Необходимым условием передачи тепла является неравенство температур в различных точках данного тела или пространства. Поэтому величина теплового потока, возникающего в среде, зависит от распределения температур в среде или характера температурного поля. *Под температурным полем понимают совокупность мгновенных значений температур во всех точках рассматриваемой среды.*

Геометрическое место всех точек с одинаковой температурой представляет собой *изотермическую поверхность*. Изотермические поверхности не пересекаются друг с другом, так как тогда их пересечения имели бы различные температуры. Поэтому все изотермические поверхности замыкаются или кончаются на границах рассматриваемого тела.

Пусть температура одной изотермической поверхности t, а другой, близлежащей изотермической поверхности, $t + \Delta t$. Предел отношения разности температур Δt этих двух поверхностей к расстоянию по нормали Δl между ними

$$\lim_{\Delta l \to 0} (\Delta t / \Delta l) = \partial t / \partial l = \operatorname{grad} t \tag{11.1}$$

называют *температурным градиентом*, который представляет собой производную от температуры по нормали к изотермической поверхности. При $\partial t / \partial l = 0$ наступает равновесие – поток теплоты прекращается. Температурный градиент является мерой интенсивности изменения температуры в данной точке. Направление теплового потока всегда совпадает с направлением падения температуры в данной точке. Тогда удельный поток теплоты q (количество теплоты, передаваемое через единицу поверхности в единицу времени) будет равен $q \sim (-\partial t / \partial l)$. Таким образом, в отличие от температуры, которая является скаляром, плотность потока теплоты представляет собой векторную величину.

11.1. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Для расчета теплообменных аппаратов широко используют кинетическое уравнение, которое выражает связь между тепловым потоком Q и поверхностью F теплопередачи, называемое *основным уравнением теплопередачи*:

$$Q = KF\Delta t_{ср}\tau, \tag{11.2}$$

где K – кинетический коэффициент (коэффициент теплопередачи), характеризующий скорость переноса теплоты; $\Delta t_{ср}$ – средняя движущая сила или средняя разность температур между теплоносителями (средний температурный напор), по поверхности теплопередачи; τ – время.

Для непрерывного процесса теплопередачи

$$Q = KF\Delta t_{\text{ср}}. \tag{11.2а}$$

Тепловой поток Q обычно определяют из теплового баланса. При этом в общем случае (без учета потери теплоты в окружающую среду)

$$Q = Q_1 = Q_2, \text{ или } Q = G_1(H_{1\text{н}} - H_{1\text{к}}) = G_2(H_{2\text{к}} - H_{2\text{н}}), \tag{11.3}$$

где Q_1 – количество теплоты, отдаваемое горячим теплоносителем; Q_2 – количество теплоты, принимаемое холодным теплоносителем; G_1 и G_2 – расход соответственно горячего и холодного теплоносителей; $H_{1\text{н}}$ и $H_{1\text{к}}$ – начальная и конечная энтальпии горячего теплоносителя; $H_{2\text{н}}$ и $H_{2\text{к}}$ – начальная и конечная энтальпии холодного теплоносителя.

Если теплоносители не меняют своего агрегатного состояния в процессе теплопередачи (процессы нагревания и охлаждения), то уравнение теплового баланса (11.3) принимает следующий вид:

$$Q = G_1 c_1 (t_{1\text{н}} - t_{1\text{к}}) = G_2 c_2 (t_{2\text{к}} - t_{2\text{н}}), \tag{11.4}$$

где c_1 и c_2 – теплоемкости горячего и холодного теплоносителя (при средней температуре теплоносителя).

Если необходимо учесть потери теплоты в окружающую среду, то полученное по уравнениям (11.3)–(11.4) значение Q следует повысить на величину этих потерь. Обычно потери теплоты в окружающую среду теплоизолированными стенками теплообменников не превышают 3–5% от Q.

Поскольку расчет тепловых потоков, как правило, проводят по уравнениям теплового баланса, то основное уравнение теплопередачи обычно используют для определения поверхности теплопередачи:

$$F = Q/(K\Delta t_{\text{ср}}\tau) \tag{11.5}$$

Движущая сила процесса $\Delta t_{\text{ср}}$ представляет собой среднюю разность температур между температурами теплоносителей. Наибольшую трудность вызывает расчет коэффициента теплопередачи K, характеризующего скорость процесса теплопередачи с участием всех трех видов переноса теплоты. Ниже (см. разд. 11.11) для определения K будет получено выражение, в которое входят величины, отражающие влияние на общую скорость процесса того или иного вида переноса теплоты. Физический смысл коэффициента теплопередачи вытекает из уравнения (11.2); его размерность:

$$[K] = \left[\frac{Q}{F\Delta t_{\text{ср}}\tau}\right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{К}}\right] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}\right].$$

При выражении Q в ккал/ч

$$[K] = \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{К}}\right], \text{ причем } 1\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{К}} = 1{,}16\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}.$$

Следовательно, *коэффициент теплопередачи показывает, какое количество теплоты передается от горячего теплоносителя к холодному за 1 с через 1 м^2 стенки при разности температур между теплоносителями, равной 1 град.*

Таким образом, чтобы рассчитать необходимую для проведения теплового процесса поверхность теплопередачи, нужно помимо движущей силы $\Delta t_{ср}$ определить коэффициент теплопередачи, значение которого зависит от ряда факторов, в том числе от вклада в общую скорость процессов переноса теплоты скоростей отдельных видов переноса – теплопроводности, теплового излучения, конвекции.

11.2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Величину теплового потока Q, возникающего в теле вследствие теплопроводности при некоторой разности температур в отдельных точках тела, определяют по закону Фурье – *основному закону теплопроводности:*

$$Q = -\lambda F \tau \partial t/\partial l, \tag{11.6}$$

или

$$q = Q/(F\tau) = -\lambda \partial t/\partial l = -\lambda \operatorname{grad} t, \tag{11.6а}$$

где q – плотность теплового потока – количество теплоты, передаваемое через единицу поверхности в единицу времени; знак минус указывает на то, что тепловой поток изменяется в сторону уменьшения температуры.

Физический смысл коэффициента теплопроводности вытекает из уравнения (11.6); его размерность:

$$[\lambda] = \left[\frac{Q\partial l}{F\tau\partial t}\right] = \left[\frac{\text{Дж}\cdot\text{м}}{\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot K}\right] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot K}\right].$$

При выражении Q в ккал/ч

$$[\lambda] = \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{К}}\right], \text{ причем } 1\frac{\text{ккал}}{\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{К}} = 1{,}16\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}.$$

Таким образом, λ *показывает, какое количество теплоты проходит вследствие теплопроводности в единицу времени через единицу поверхности теплообмена при падении температуры на один градус на единицу длины нормали к изотермической поверхности.* Иначе говоря, коэффициент теплопроводности является физической характеристикой вещества, определяющей способность тела проводить теплоту; он зависит от природы вещества, его структуры, температуры и других факторов.

При обычных условиях наибольшее значение коэффициента теплопроводности имеют металлы [например, для меди $\lambda \approx \approx 400$ Вт/(м·К), для стали $\lambda \approx 50$ Вт/(м·К), и т. д.], наименьшее – газы [например, для воздуха $\lambda = 0{,}027$ Вт/(м·К)]. Теплоизоляционные и строительные материалы обычно имеют пористую структуру, а в порах находится воздух, который плохо проводит теплоту, поэтому эти материалы имеют очень низкие значения коэффициентов теплопроводности [$\lambda \approx 0{,}04 \div 3$ Вт/(м·К)]. Капельные жидкости имеют $\lambda \approx 0{,}1 \div 0{,}7$ Вт/(м·К), т. е. занимают промежуточное положение между металлами и газами. С повышением температуры коэффициент теплопроводности газов увеличивается, несколько увеличивается λ для газов и с увеличением давления. Для жидкостей и металлов коэффициенты теплопроводности с увеличением температуры обычно снижаются (за исключением воды, коэффициент теплопроводности которой несколько возрастает при повышении температуры до 130 °С, а при дальнейшем ее повышении начинает снижаться). Обычно в тепловых расчетах коэффициент теплопроводности берут при средней температуре данного вещества.

Уравнение теплопроводности плоской стенки. Ранее (см. гл. 3) на базе основного уравнения переноса субстанции [уравнение (3.26)] было получено дифференциальное уравнение теплопроводности в неподвижной среде, или уравнение Фурье (3.42):

$$\partial t/\partial\tau = a(\partial^2 t/\partial x^2 + \partial^2 t/\partial y^2 + \partial^2 t/\partial z^2).$$

При установившемся процессе $\partial t/\partial\tau = 0$, и уравнение (3.42) примет вид

$$a(\partial^2 t/\partial x^2 + \partial^2 t/\partial y^2 + \partial^2 t/\partial z^2) = 0. \tag{11.7}$$

Поскольку коэффициент температуропроводности $a = \lambda/(c\rho)$ не может быть равен нулю, то, следовательно,

$$\partial^2 t/\partial x^2 + \partial^2 t/\partial y^2 + \partial^2 t/\partial z^2 = 0. \tag{11.8}$$

Уравнение (11.8) является *дифференциальным уравнением теплопроводности в неподвижной среде при установившемся тепловом режиме*. Это уравнение в общем виде описывает распределение температур при переносе теплоты теплопроводностью в неподвижной среде.

Рассмотрим перенос теплоты теплопроводностью при установившемся процессе через плоскую стенку (рис. 11-1), длина и ширина которой существенно больше ее толщины δ. Примем, что $t_{ст.1} > t_{ст.2}$, изотермические плоские поверхности параллельны оси x, коэффициент теплопроводности в интервале $t_{ст.1} - t_{ст.2}$ не зависит от температуры, изменение температуры происходит только в направлении оси x. При установившемся процессе количества теплоты (подведенное к стенке и отведенное от нее) не изменяются во времени и равны между собой.

Поскольку температурное поле одномерно, то $\partial t/\partial y = 0$, $\partial t/\partial z = 0$, и уравнение (11.8) примет вид

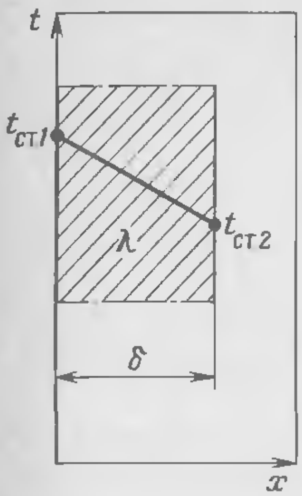
$$\partial^2 t/\partial x^2 = 0. \tag{11.9}$$

Интегрируем уравнение (11.9), предварительно заменив частную производную на обыкновенную (так как температура зависит только от одной переменной):

$$\mathrm{d}t/\mathrm{d}x = C_1; \quad (11.10) \qquad t = C_1 x + C_2, \quad (11.11)$$

где C_1 и C_2 – константы интегрирования.

Уравнение (11.11) показывает, что температура по толщине стенки изменяется прямолинейно. Для определения значений C_1



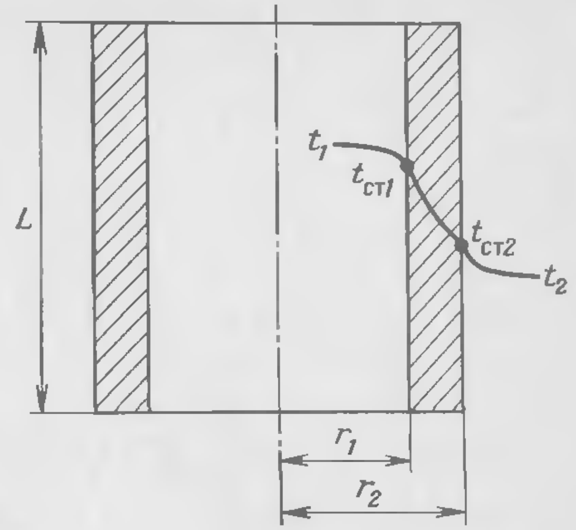


Рис. 11-1. К выводу уравнения теплопроводности плоской стенки

Рис. 11-2. К выводу уравнения теплопроводности цилиндрической стенки

и C_2 примем граничные условия: при $x = 0$ $t = t_{\text{ст.1}}$ и $t_{\text{ст.1}} = C_2$; при $x = \delta$ $t = t_{\text{ст.2}}$ и $t_{\text{ст.2}} = C_1\delta + C_2$ [из уравнения (11.11)].

Тогда $t_{\text{ст.2}} = C_1\delta + t_{\text{ст.1}}$, откуда $C_1 = (t_{\text{ст.2}} - t_{\text{ст.1}})/\delta$.

С учетом (11.10)

$$\mathrm{d}t/\mathrm{d}x = (t_{\text{ст.2}} - t_{\text{ст.1}})/\delta.$$

Подставив полученное выражение в уравнения (11.6) и (11.6а), имеем

$$Q = \lambda(t_{\text{ст.1}} - t_{\text{ст.2}})F\tau/\delta; \tag{11.12}$$

$$q = Q/(F\tau) = \lambda(t_{\text{ст.1}} - t_{\text{ст.2}})/\delta = \lambda\Delta t/\delta. \tag{11.12а}$$

Уравнение (11.12) называют *уравнением теплопроводности плоской стенки при установившемся процессе теплопереноса.* В этом уравнении величина λ/δ характеризует тепловую проводимость стенки, а обратная величина (δ/λ) – термическое сопротивление стенки.

Для многослойной стенки, имеющей n слоев с разными коэффициентами теплопроводности и толщиной, к каждому слою можно применить уравнение (11.12а). Тогда

$$q = \lambda_1\Delta t_1/\delta_1 = \lambda_2\Delta t_2/\delta_2 = \ldots = \lambda_n\Delta t_n/\delta_n.$$

Поскольку $\Delta t_i = q(\delta_i/\lambda_i)$, а $\sum\limits_{i=1}^{i=n} \Delta t_i = \Delta t$ (причем $\Delta t = t_{\text{ст.1}} - t_{\text{ст.}n}$ – общая разность температур в многослойной стенке; Δt_i – разность температур в i-м слое), имеем

$$\Delta t = q \sum_{i=1}^{i=n} (\delta_i/\lambda_i).$$