

Теплопередача – наука о *самопроизвольных необратимых* процессах распространения теплоты в переменном поле температур. В движущихся средах процессы теплопередачи зависят от скорости перемещения текущей среды.

Согласно второму закону термодинамики самопроизвольный процесс распространения теплоты происходит в сторону уменьшения температуры.

В отличие от методов термодинамического анализа, при изучении теплообмена рассматривают развитие процессов переноса в пространстве и во времени. В результате решения задачи теплообмена находят распределения температур, а также потоков теплоты как функции координат и времени.

В базовом курсе теплопередачи в основном будем рассматривать процессы *теплообмена* в данном теле или системе тел, поэтому наша задача научиться рассчитывать *температурные поля и тепловые потоки* в пространстве и времени.

Температурное поле. Изотермическая поверхность

Температурное поле есть совокупность значений температуры во всех точках данной расчетной области и во времени.

Температурное поле будем обозначать $T(x_i, \tau)$, где x_i – координаты точки, м; τ – время, с.

Температурное поле характеризуют количеством координат и его поведением во времени. В расчетах теплообмена используют ортогональную систему координат $x_i = x_1, x_2, x_3$, которая для декартовой, цилиндрической и сферической систем координат принимает вид:

$x_i = x, y, z$ – декартова система координат (рис. 10.1);

$x_i = r, \varphi, z$ – цилиндрическая система координат (рис. 10.2);

$x_i = r, \varphi, \psi$ – сферическая система координат (рис. 10.3).

В зависимости от числа координат различают *трехмерное, двумерное, одномерное* и *нульмерное (однородное)* температурные поля.

Температурное поле, которое *изменяется во времени*, называют *нестационарным* температурным полем. И, наоборот, температурное поле, которое *не изменяется во времени*, называют *стационарным* температурным полем.

Примеры записи температурных полей:

$T(x, y, z, \tau)$ – трехмерное нестационарное температурное поле;

$T(\tau)$ – нульмерное нестационарное температурное поле;

$T(x)$ – одномерное стационарное температурное поле;

$T \neq f(x_i, \tau) = \text{const}$ – нульмерное стационарное температурное поле, которое описывается термодинамической (равновесной) температурой системы.

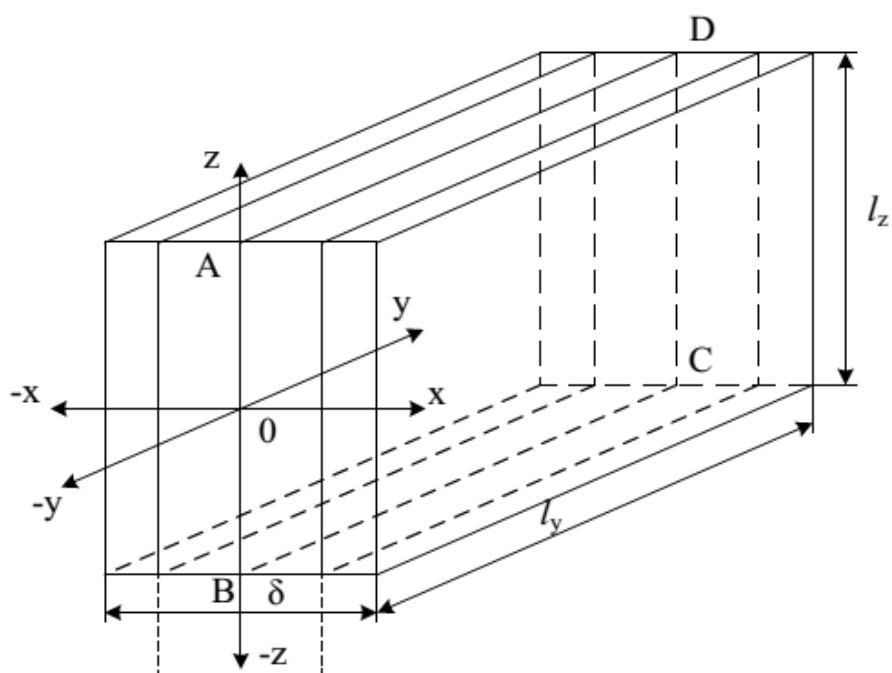


Рис.10.1. Декартова система координат.

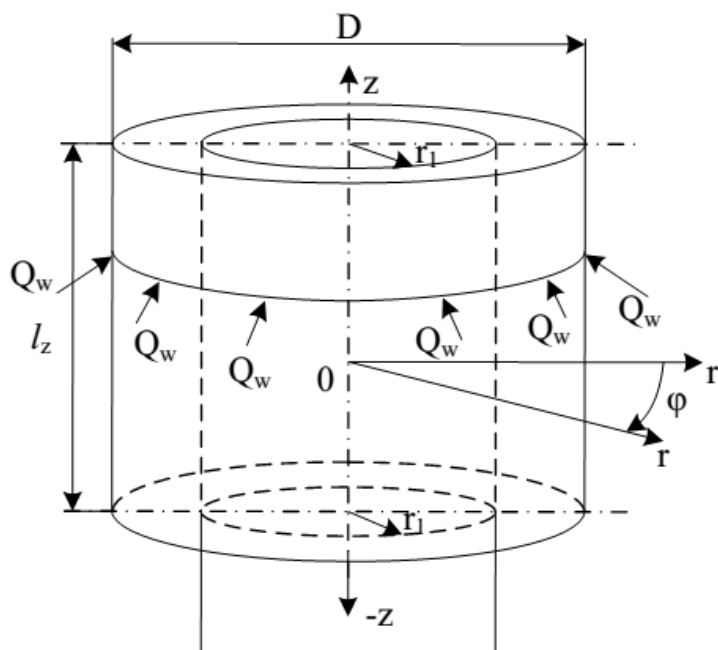


Рис.10.2. Цилиндрическая система координат.

Изотермическая поверхность – поверхность равных температур.

Свойства изотермических поверхностей:

а) изотермические поверхности не пересекаются;

б) в нестационарных процессах изотермические поверхности перемещаются в пространстве.

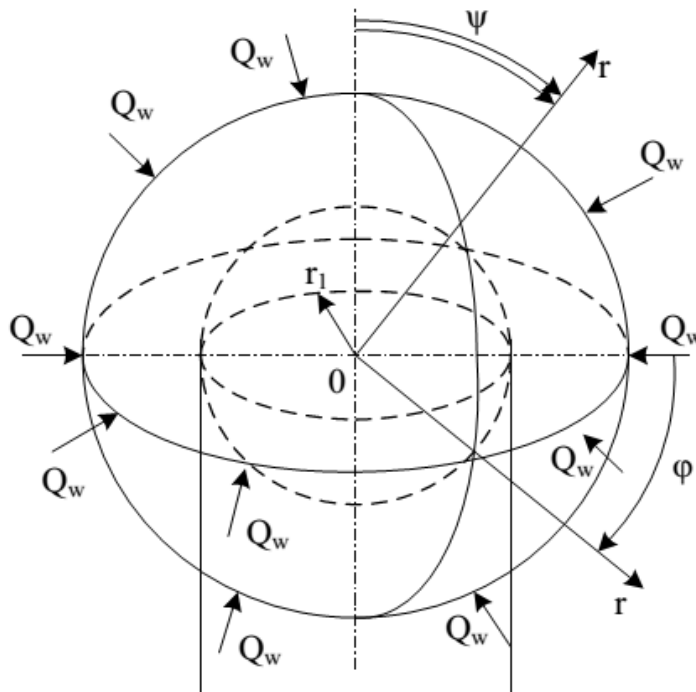


Рис.10.3. Сферическая система координат.

В нашем курсе мы будем рассматривать теплообмен в телах так называемой простой или классической формы. Таких тел три:

- бесконечная или неограниченная пластина – пластина, у которой толщина много меньше (в несколько раз) длины и ширины ($\delta \ll l_x, l_y$) и условия теплообмена на поверхности пластины одинаковы (рис. 10.1);
- бесконечный цилиндр – цилиндр, у которого диаметр много меньше (в несколько раз) длины цилиндра ($D \ll l_z$) и условия теплообмена на поверхности цилиндра одинаковы (рис. 10.2);
- шар или сфера при одинаковых условиях теплообмена на всей поверхности тела (рис. 10.3).

Изотермические поверхности в бесконечной пластине при одинаковых на обеих поверхностях пластины условиях теплообмена – это плоскости, параллельные плоскостям, образующим данную пластину (рис. 10.1). Например, на всей центральной плоскости ABCD в данный момент времени существует температура T_0 , а на внешних поверхностях пластины – температура T_w . Аналогично можно построить изотермические поверхности в виде плоскостей, параллельных образующим плоскостям пластины, для любой температуры в области ее изменения. На рис. 10.1 изображены изотермические поверхности для температуры T_1 .

Изотермические поверхности в бесконечном цилиндре при одинаковых на всей его поверхности условиях теплообмена – соосные (коаксиальные)

цилиндрические поверхности или, другими словами, вложенные друг в друга цилиндры (рис. 10.2). Например, на всей внешней поверхности цилиндра существует температура T_w , а на цилиндрической поверхности радиусом r_1 – температура T_1 . Аналогично можно построить изотермические поверхности для любой температуры в области ее изменения.

В шаре при одинаковых на всей его поверхности условиях теплообмена изотермические поверхности представляют собой вложенные друг в друга сферы (рис. 10.3). Например, на внешней поверхности шара существует температура T_w , а на сферической поверхности радиусом r_1 – температура T_1 .

Градиент температурного поля

Градиент температурного поля или *градиент температуры* – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры и численно равный изменению температуры на единице длины:

$$\text{grad}(T) = \vec{n}_0 \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (10.1)$$

где n – нормаль к изотермической поверхности; n_0 – единичный вектор нормали.

Градиент температуры обозначают также символом

$\nabla(T)$. В этом случае формулу (10.1) записывают в виде

$$\nabla(T) = \vec{n}_0 \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (10.2)$$

где ∇ – оператор Гамильтона («набла») – символический вектор, заменяющий символ градиента.

В декартовой системе координат градиент температурного поля имеет координаты:

$$\text{grad}(T) = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}, \quad (10.3)$$

где \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} – единичные векторы или орты в декартовой системе координат.

В цилиндрической системе координат градиент температурного поля имеет координаты

$$\text{grad}(T) = \frac{\partial T}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{e}_z, \quad (10.4)$$

где \vec{e}_r , \vec{e}_φ , \vec{e}_z – единичные векторы в цилиндрической системе координат.

В сферической системе координат градиент температурного поля имеет координаты

$$\text{grad}(T) = \frac{\partial T}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r \cdot \sin \psi} \cdot \frac{\partial T}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \psi} \vec{e}_\psi, \quad (10.5)$$

где $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_\psi$ – единичные векторы в сферической системе координат.

Градиент одномерного температурного поля в бесконечной пластине, бесконечном цилиндре и шаре рассчитывают по формулам:

$$\text{grad}(T) = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i}; \quad \text{grad}(T) = \frac{\partial T}{\partial r} \vec{e}_r. \quad (10.6)$$

Количество теплоты. Тепловой поток. Удельные тепловые потоки

Количество теплоты – количество тепловой энергии, полученное или отданное телом (твердым, жидким или газообразным) или проходящее через это тело за заданное время τ в результате теплообмена.

Обозначают количество теплоты Q_τ и измеряют в системе СИ в джоулях (Дж) или в технической системе единиц в калориях (кал):

Тепловой поток равен количеству теплоты, проходящему через заданную и нормальную к направлению распространения теплоты поверхность *в единицу времени*:

$$\vec{Q} = \vec{n}_0 \frac{dQ_\tau}{d\tau}. \quad (10.7)$$

Тепловой поток характеризует интенсивность теплообмена во времени или мощность теплообмена и поэтому его измеряют в Ваттах. При стационарном режиме теплообмена и при одинаковых условиях теплообмена на поверхности тела тепловой поток не изменяется во времени и его рассчитывают по формуле

$$Q = \frac{Q_\tau}{\tau}. \quad (10.8)$$

В расчетах теплообмена используют три удельных тепловых потока: поверхностную плотность теплового потока, линейную плотность теплового потока и объемную плотность теплового потока.

Поверхностная плотность теплового потока (q , Вт/м²) – тепловой поток, отнесенный к площади поверхности тела.

Линейная плотность теплового потока (q_ℓ , Вт/м) – тепловой поток, отнесенный к длине протяженного тела с произвольным, но постоянным по длине поперечным сечением.

Объемная плотность теплового потока (q_v , Вт/м³) – тепловой поток, отнесенный к объему тела.

Поверхностная плотность теплового потока равна количеству теплоты, проходящему через заданную и нормальную к направлению распространению теплоты *единичную* площадку в *единицу* времени или тепловому потоку, проходящему через заданную *единичную* площадку:

$$\vec{q} = \vec{n}_0 \frac{d^2 Q_\tau}{d\tau dF} = \frac{d\vec{Q}}{dF}, \quad (10.9)$$

В стационарном режиме и при одинаковых условиях теплообмена на всей поверхности тела:

$$\vec{q} = \frac{Q_\tau}{\tau F} = \frac{Q}{F}, \quad (10.10)$$

Зная поверхностную плотность теплового потока, можно рассчитать тепловой поток и количество теплоты за время теплообмена τ :

$$Q = q \cdot F \quad \text{и} \quad Q_\tau = q \cdot F \cdot \tau = Q \cdot \tau \quad (10.11)$$

Линейная плотность теплового потока равна тепловому потоку, проходящему через боковую поверхность *единичной* длины протяженного тела с произвольным, но постоянным по длине поперечным сечением. В стационарном режиме и при одинаковых условиях теплообмена на всей поверхности тела

$$q_\ell = \frac{Q_\tau}{\tau \cdot \ell} = \frac{Q}{\ell} \quad (10.12)$$

Зная линейную плотность теплового потока, можно рассчитать тепловой поток и количество теплоты за время теплообмена τ :

$$Q = q_\ell \cdot \ell \quad \text{и} \quad Q_\tau = q_\ell \cdot \ell \cdot \tau = Q \cdot \tau \quad (10.13)$$

Удельные тепловые потоки q и q_ℓ связаны между собой следующим соотношением:

$$q_\ell = q \cdot \Pi, \quad (10.14)$$

где Π – периметр протяженного тела, м.

Например, для трубы диаметром d периметр равен длине окружности ($\Pi = \pi d$) и формула (10.14) принимает вид

$$q_{\rho} = q \cdot \pi \cdot d, \quad (10.15)$$

Объемная плотность теплового потока характеризует мощность действия внутренних источников (стоков) теплоты и равна количеству теплоты, которое выделяется или поглощается внутри *единичного объема* тела *в единицу времени*. Объемная плотность теплового потока – величина скалярная и не имеет направления. Поэтому удельную величину q_v – теплоту, выделяемую (поглощаемую) в единичном объеме за единицу времени, – в принципе, нельзя называть удельным тепловым потоком. Однако такой термин в теплотехнике используют для единства терминологии удельных тепловых потоков. В стационарном режиме теплообмена и при условии равномерного распределения внутренних источников (стоков) теплоты в объеме тела можем записать

$$q_v = \frac{Q_{\tau}}{\tau \cdot V} = \frac{Q}{V}, \quad (10.16)$$

где τ – время, с; V – объем тела, м³.

Зная q_v , можно рассчитать мощность теплообмена (тепловой поток) и количество теплоты за время действия источника τ

$$Q = q_v \cdot V \text{ и } Q_{\tau} = q_v \cdot V \cdot \tau = Q \cdot \tau. \quad (10.17)$$

Внутренние источники (стоки) теплоты могут быть различной геометрической формы (точечной, линейной, плоской и т.п.) и действовать в разных областях тела в различные моменты времени с разной интенсивностью. Объемную плотность теплового потока q_v используют в расчетах теплообмена, возникающего вследствие протекания процессов другой физической природы (ядерных, электрических, механических, химических и ряда других процессов) с выделением или поглощением теплоты. Поэтому объемную плотность теплового потока q_v используют в расчетах теплообмена в ядерном реакторе, при прохождении электрического тока по проводнику с большим сопротивлением, при химических реакциях и т.п.

Величина q_v может быть как положительной (теплота выделяется), так и отрицательной (теплота поглощается).

Элементарные способы передачи теплоты. Сложный теплообмен

В природе существуют три элементарных способа передачи теплоты: *теплопроводность (кондукция), конвекция и тепловое излучение (радиационный теплообмен)*.

Теплопроводность (кондукция) – способ передачи теплоты за счет взаимодействия микрочастиц тела (атомов, молекул, ионов в электролитах и электронов в металлах) в переменном поле температур. Теплопроводность происходит в твердых, жидких и газообразных телах. В твердых телах

теплопроводность является единственным способом передачи теплоты. В вакууме теплопроводность отсутствует.

Конвекция – способ передачи теплоты за счет перемещения макрообъемов среды из области с одной температурой в область с другой температурой. При этом текучая среда (флюид) с более высокой температурой перемещается в область низких температур, а холодный флюид поступает в область высоких температур. В вакууме конвекция теплоты невозможна. Конвекция теплоты всегда происходит совместно с теплопроводностью (кондукцией теплоты), так как макрообъемы текучей среды состоят из микрочастиц вещества и существует неравномерное по пространству температурное поле. Передачу теплоты совместно теплопроводностью и конвекцией называют *конвективным теплообменом*, который уже не является элементарным способом передачи теплоты. Конвективный теплообмен относят к *сложному теплообмену*.

Тепловое излучение (радиационный теплообмен) – способ переноса теплоты в пространстве, осуществляемый в результате распространения электромагнитных волн, энергия которых при взаимодействии с веществом переходит в теплоту. Радиационный теплообмен связан с двойным преобразованием энергии: первоначально внутренняя энергия тела превращается в энергию электромагнитного излучения, а затем, после переноса энергии в пространстве электромагнитными волнами, происходит обратный переход лучистой энергии во внутреннюю энергию другого тела. Тепловое излучение вещества зависит от температуры тела (степени нагретости вещества). Поэтому все тела с температурой выше нуля Кельвина обладают собственным тепловым излучением. Для передачи теплоты излучением не требуется тело-посредник, т.е. лучистая энергия может передаваться в лучепрозрачной среде и в вакууме. В природе и в технических устройствах все три способа передачи теплоты могут происходить одновременно или в комбинации друг с другом. Такой теплообмен называют *сложным теплообменом*. При этом совместную передачу теплоты теплопроводностью и конвекцией называют *конвективным теплообменом*. Совместную передачу теплоты излучением и теплопроводностью называют *радиационно-кондуктивным теплообменом*. Совместную передачу теплоты излучением, конвекцией и теплопроводностью называют *радиационно-конвективным теплообменом*.

Расчет тепловых потоков в процессе теплообмена

Для всех способов переноса теплоты существует функциональная связь между переменным температурным полем и тепловым потоком в каждой точке этого поля. Иногда эту функциональную связь называют основным законом переноса теплоты. Рассмотрим расчет теплового потока в области с заданным температурным полем в процессе теплопроводности, конвективного теплообмена и теплового излучения.

А. Теплопроводность В 1807 году французский ученый Фурье (Fourier) установил, что в каждой точке тела в процессе теплопроводности существует однозначная связь между тепловым потоком и градиентом температуры

$$\vec{Q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \cdot F, \quad (10.18)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К). Закон Фурье для поверхностной плотности теплового потока имеет вид

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T), \quad (10.19)$$

Знак минус в записи закона Фурье (10.18) и (10.19) показывает, что векторы теплового потока и градиента температуры направлены в противоположные стороны. Градиент температурного поля направлен по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры, а тепловой поток, наоборот, в сторону ее убывания.

Коэффициент теплопроводности λ характеризует способность данного тела (вещества) проводить теплоту. Коэффициент теплопроводности веществ определяют экспериментально и приводят в справочной литературе. Закон Фурье справедлив для нестационарных и стационарных процессов теплопроводности в твердых, жидких и газообразных телах.

Б. Конвективный теплообмен

Конвекция теплоты в текучих средах всегда протекает совместно с теплопроводностью. Поэтому плотность теплового потока при конвективном теплообмене в каждой точке текучей среды рассчитывают по формуле

$$\vec{q}_{\text{кто}} = \vec{q}_{\text{конд}} + \vec{q}_{\text{конв}} = -\lambda_f \nabla T + \rho \vec{w} h, \quad (10.20)$$

$\vec{q}_{\text{кто}}$ – плотность теплового потока при конвективном теплообмене, Вт/м²;

$\vec{q}_{\text{конд}}$ – плотность теплового потока при кондуктивном (за счет теплопроводности) теплообмене в текучей среде, Вт/ м²;

$\vec{q}_{\text{конв}}$ – плотность теплового потока за счет конвекции текучей среды (флюида), Вт/м²;

λ_f – коэффициент теплопроводности флюида, Вт/(м·К);

∇T – градиент температурного поля флюида, К/м;

ρ – плотность флюида, кг/м³;

w – скорость движения флюида, м/с;

$h = c_p \cdot T$ – удельная энтальпия флюида, Дж/кг;

Из анализа формулы (10.16) следует, что для расчета теплового потока при конвективном теплообмене необходимо предварительно рассчитать не только температурное поле текучей среды, но ее поле скорости.

Тепловой поток, получаемый или отдаваемый однофазным теплоносителем, при его перемещении в техническом устройстве с изменением температуры на конечную величину δT вследствие теплообмена, равен:

$$Q = G \cdot c_p \cdot \delta T = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \delta T, \quad (10.21)$$

где $G = \rho \cdot \bar{w} \cdot f$ – массовый расход теплоносителя, кг/с;

$\dot{V} = \frac{G}{\rho} = \bar{w} \cdot f$ – объемный расход теплоносителя, м³/с;

\bar{w} – средняя скорость течения флюида, м/с;

f – площадь поперечного сечения канала, в котором движется теплоноситель, м²;

c_p – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);

δT – изменение температуры теплоносителя в процессе теплообмена, °С или К.

Тепловой поток, получаемый или отдаваемый текучей средой, при изменении ее агрегатного состояния (жидкость ↔ газ) рассчитывают по формуле

$$Q = G \cdot r, \quad (10.22)$$

где G – массовый расход флюида, кг/с; r – скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг.

В. Теплообмен излучением

Энергия теплового излучения, падающего на тело, может поглощаться телом, отражаться от тела или проходить через данное тело. Тело, которое поглощает всю падающую на него лучистую энергию, называют *абсолютно черным телом* (АЧТ). Отметим, что при данной температуре АЧТ и излучает максимально возможное количество энергии. Плотность потока собственного излучения тела называют его *лучеиспускательной способностью* или *интегральной интенсивностью излучения*. Зная температуру тела, лучеиспускательную способность АЧТ рассчитывают по закону Стефана–Больцмана

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 = c_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (10.23)$$

где E_0 – лучеиспускательная способность АЧТ, Вт/м²;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана;

$c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

T – абсолютная температура АЧТ, К.

Абсолютно черных тел в природе не существует. Собственное излучение реальных тел заменяют излучением *серого тела*. Расчет лучеиспускательной способности *серого тела* выполняют по формуле

$$E = \varepsilon \cdot E_0, \quad (10.24)$$

где E – лучеиспускательная способность серого тела, Вт/м²;

ε – интегральная степень черноты серого тела ($0 \leq \varepsilon \leq 1$);

Степень черноты твердых тел определяют экспериментально и в зависимости от физических свойств тела, его температуры и шероховатости поверхности приводят в справочниках. Степень черноты поглощающих и излучающих энергию газов рассчитывают в зависимости от состава газа, размеров газового объема и его температуры на основе экспериментальных данных, приведенных в справочной литературе, как правило, в графическом виде. Тепловой поток собственного излучения тела рассчитывают по формуле

$$Q = E \cdot F_w, \quad (10.25)$$

где F_w – площадь поверхности твердого тела или поверхности газовой оболочки, м².

§ 1.6. Теплоотдача

Теплоотдача – это процесс сложного теплообмена в области пограничного слоя на границе раздела фаз:

- между твердой стенкой и окружающей средой;
- между капельной жидкостью и окружающей средой.

Процесс теплоотдачи между капельной жидкостью и окружающей средой – газом, как правило, сопровождается массообменом. Под *окружающей средой* (*окружением*) для тела (твердого или жидкого) при его теплоотдаче понимают:

- при *конвективной* теплоотдаче: любую текучую среду (жидкость или газ);
- при *лучистой* теплоотдаче: излучающую и поглощающую газовую среду, либо систему твердых тел (оболочку), разделенных лучепрозрачной или частично поглощающей излучение газовой средой, с данным телом.

График температурного поля при *теплоотдаче* между твердой стенкой и текучей окружающей текучей средой показан на рис. 10.4. Температура текучей среды изменяется в очень узкой области, которую называют *тепловым пограничным слоем*. Заметим, что в зависимости от соотношения температур стенки T_w и флюида T_f тепловой поток Q может поступать на тело при условии $T_f > T_w$ или уходить с поверхности тела, если $T_f < T_w$.

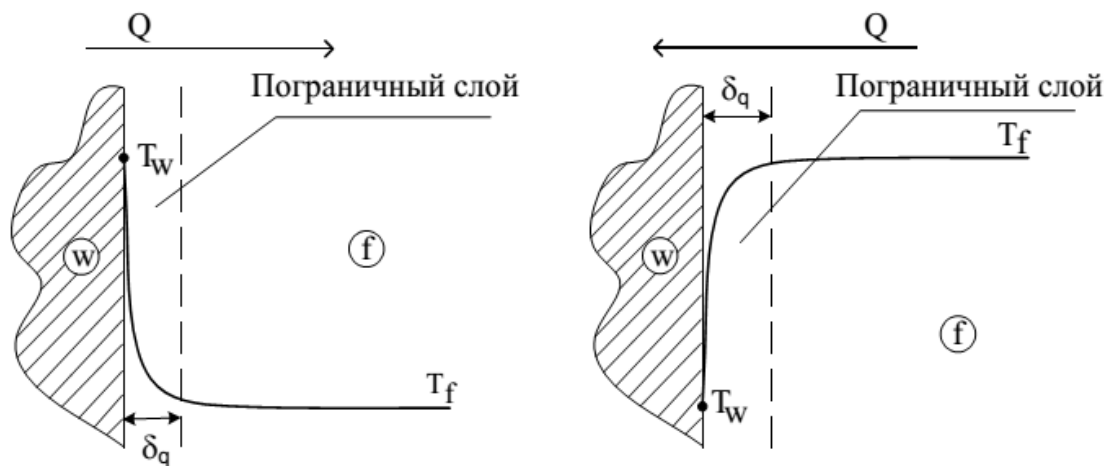


Рис. 1.4. Схема процесса теплоотдачи:
 T_w – температура стенки; T_f – температура текучей среды;
 δ_q – толщина теплового пограничного слоя

Конвективная теплоотдача происходит за счет конвективного теплообмена и в чистом виде имеет место при течении около твердых поверхностей различной формы лучепрозрачной каплевой жидкости. Конвективная теплоотдача может происходить одновременно с изменением агрегатного состояния теплоносителя, которое сопровождается выделением (при конденсации) или поглощением (при кипении и испарении) теплоты фазового перехода.

Лучистая (радиационная) теплоотдача имеет место при радиационном теплообмене между стенкой и излучающим (поглощающим) газом, а также между стенкой и твердой оболочкой, заполненной лучепрозрачным или частично поглощающим излучение газом. В чистом виде лучистая теплоотдача наблюдается при радиационном теплообмене в вакууме или сильно разреженных газах.

Если тело окружает газ, то сложный теплообмен на границе раздела фаз происходит одновременно за счет конвективного теплообмена и теплового излучения. Такой процесс сложного теплообмена называют *радиационно-конвективной теплоотдачей*. Расчет *теплоотдачи* заключается в определении теплового потока, которым обмениваются стенка и окружающая среда. В инженерных расчетах тепловой поток при теплоотдаче находят по закону теплоотдачи Ньютона (1701)

$$Q = \alpha \cdot |T_f - T_w| \cdot F_w, \quad (10.26)$$

где Q – тепловой поток, Вт;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

T_f и T_w – температуры окружающей среды и поверхности тела (поверхности раздела фаз), °С или К;

F_w – площадь поверхности теплообмена, м².

При заданных геометрических размерах системы теплообмена, известных температурах поверхности тела и текучей среды задача расчета теплового потока сводится к определению коэффициента теплоотдачи α .

Коэффициент теплоотдачи α не имеет физического смысла и является коэффициентом пропорциональности в законе теплоотдачи Ньютона.

Коэффициент конвективной теплоотдачи α_k находят экспериментально, следуя правилам и требованиям теории подобия. При этом результаты эксперимента представляют в виде критериальных уравнений подобия. Критериальные уравнения приведены в справочниках и учебниках по теплообмену и будут рассмотрены ниже.

Коэффициент лучистой теплоотдачи α_l от газа к твердой стенке рассчитывают по формуле

$$\alpha_l = \frac{Q_w}{(T_f - T_w) \cdot F} = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_f^4 - T_w^4)}{(T_f - T_w)}, \quad (10.27)$$

Q_w – результирующий тепловой поток излучением между поверхностью тела и окружением, Вт;

T_f и T_w – температуры окружающей среды и поверхности тела, К;

F_w – площадь поверхности теплообмена, м²;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты в системе тел, участвующих в радиационном теплообмене. Например, приведенную степень черноты в системе газ – стенка можно рассчитать по формуле Нуссельта:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_g} - \frac{1}{\varepsilon_w} - 1}, \quad (10.28)$$

где ε_g и ε_w – степень черноты газа и стенки соответственно. Тепловой поток при радиационно-конвективном теплообмене находят по формуле

$$Q = Q_k + Q_l = (\alpha_k + \alpha_l) \cdot |T_f - T_w| \cdot F_w. \quad (10.29)$$

Основные понятия массообмена

В природе наблюдается аналогия процессов переноса теплоты и массы, поэтому формулировки основных параметров и законов массообмена аналогичны формулировкам параметров и законов теплообмена. При

наличии в среде неоднородного поля концентраций i -го компонента смеси происходит *самопроизвольный* и *необратимый* процесс переноса массы этого компонента в направлении уменьшения его концентрации, т.е. происходит процесс *массообмена*. Расчет *массообмена* заключается в определении *поля концентраций* компонентов смеси и *потоков массы* компонентов смеси. В расчетах массообмена используют объемную (парциальную плотность) и массовую (относительную) концентрации. По определению объемная концентрация (парциальная плотность) ρ_i (кг/м³) и относительная массовая концентрация C_i (кг/кг) i -го компонента смеси равны:

$$\rho_i = \frac{M_i}{V_{\text{см}}}; \quad (10.30)$$

$$C_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}}, \quad (10.31)$$

где $V_{\text{см}}$ – объем смеси, м³; $M_{\text{см}}$ – масса смеси, кг. Сравнивая выражения (10.30) и (10.31), получим функциональную связь относительной (массовой) концентрации i -го компонента смеси C_i и его парциальной плотности ρ_i (объемной концентрации):

$$C_i = \frac{\rho_i}{\rho} \text{ или } \rho_i = \rho C_i, \quad (10.32)$$

Поле концентраций i -го компонента смеси есть совокупность значений концентраций этого компонента смеси во всех точках данной расчетной области и во времени. В зависимости от способа задания концентрации поле концентраций i -го компонента смеси обозначают как $\rho_i(x_j, \tau)$ или $C_i(x_j, \tau)$.

Поле концентрации в зависимости от числа координат x_j может быть трехмерным, двумерным и одномерным. Поле концентрации, изменяющееся во времени τ , называют *нестационарным* и, наоборот, поле концентраций, не изменяющееся с течением времени – *стационарным*. Для количественного описания процесса переноса массы используют понятия *потока массы* и *плотности потока массы* данного компонента смеси. *Поток массы* i -го компонента смеси равен массе этого компонента, которая проходит через заданную и нормальную к направлению распространения массы поверхность *в единицу времени*:

$$\vec{m}_i = \vec{n}_0 \frac{dM_i}{d\tau}, \quad (10.33)$$

где \vec{m}_i – поток массы i -го компонента смеси, кг/с;

\vec{n}_0 – единичный вектор нормали; M_i – масса i -го компонента смеси, кг;

τ – время, с.

Плотность потока массы i -го компонента смеси равна массе этого компонента, которая проходит через заданную и нормальную к направлению распространения массы *единичную* площадку в *единицу времени* или равна потоку массы, проходящему через заданную *единичную* площадку:

$$\vec{j}_i = \vec{n}_0 \frac{d^2 M_i}{d\tau \cdot dF} = \frac{d\vec{m}_i}{dF}, \quad (10.34)$$

где F – площадь поверхности массообмена, м².

При стационарном режиме массообмена и при одинаковых условиях массообмена на всей поверхности F поток массы и плотность потока массы не изменяются во времени, поэтому их рассчитывают по формулам

$$m_i = \frac{M_i}{\tau}; \quad j_i = \frac{M_i}{\tau \cdot F} = \frac{m_i}{F}. \quad (10.35)$$

Так же как и при переносе теплоты, в природе существуют два механизма массопереноса: *диффузионный* и *конвективный*.

Диффузионный массоперенос

Согласно молекулярно-кинетической теории, механизм диффузии компонент смеси заключается во взаимном проникновении микрочастиц (атомов, молекул, ионов) разных сортов в результате их движения в сторону уменьшения своей концентрации. При наличии переменного поля концентраций диффузия существует в твердых, жидких и газообразных средах. В случае отдельно протекающих процессов теплообмена и массообмена связь между плотностью потока массы и полем концентрации устанавливает закон Фика

$$\vec{j}_i = -D_i \cdot \text{grad}(\rho_i) \quad (10.36)$$

или

$$\vec{j}_i = -\rho D_i \cdot \text{grad}(C_i), \quad (10.37)$$

где D_i – коэффициент диффузии i -го компонента смеси, м²/с;

Знак минус в формулах (10.36) и (10.37) указывает на противоположные направления потока массы и градиента концентрации. *Градиент концентрации* i -го компонента смеси – вектор, направленный по нормали к поверхности равных концентраций в сторону увеличения концентрации и численно, равный изменению концентрации на единицу длины.

Конвективный массоперенос

При движении смеси совместно с диффузией происходит конвективный массоперенос. В этом случае плотность потока массы i -го компонента смеси равна сумме диффузионной и конвективной его составляющих

$$\vec{J}_{i, \text{КМО}} = \vec{J}_{i, \text{дифф}} + \vec{J}_{i, \text{конв}} = -\rho \cdot D_i \cdot \text{grad}(C_i) + \rho \cdot \vec{w} \cdot C_i, \quad (10.38)$$

где $\vec{J}_{i, \text{КМО}}$ – плотность потока массы при конвективном массообмене, кг/(м²·с);

$\vec{J}_{i, \text{дифф}}$ – плотность молекулярного диффузионного потока массы, кг/(м²·с);

$\vec{J}_{i, \text{конв}}$ – плотность конвективного потока массы, кг/(м²·с).

Конвективный массообмен может происходить как в объеме жидкого или газообразного тела, так и на границе раздела фаз в области пограничного слоя. В этом случае говорят о процессе *массоотдачи*.

Массоотдача – это процесс массообмена на границе раздела фаз:

- ✓ между твёрдой стенкой и окружающей текучей средой (капельной жидкостью или газом);
- ✓ между капельной жидкостью и газом.

Аналогично закону теплоотдачи Ньютона закон массоотдачи записывают в виде

$$j_{i,w} = \beta \cdot |\rho_{i,f} - \rho_{i,w}| = \beta \cdot \rho \cdot |C_{i,f} - C_{i,w}|,$$

где $j_{i,w}$ – плотность потока массы i -го компонента смеси, поступающего на поверхность или уходящего с поверхности, кг/(м²·с);

β – коэффициент массоотдачи, м/с;

$\rho_{i,f}$ и $\rho_{i,w}$ – парциальные плотности i -го компонента смеси в текучей среде и на поверхности раздела фаз, кг/м³;

$C_{i,f}$ и $C_{i,w}$ – массовые (относительные) концентрации i -го компонента смеси в текучей среде и на поверхности раздела фаз, кг/кг;

ρ – плотность смеси, кг/м³.

Значения коэффициентов массоотдачи в инженерных расчетах находят по эмпирическим формулам, полученным в результате обработки многочисленных экспериментальных данных.

Классификация задач тепломассообмена

Классификация позволяет на стадии постановки задачи расчета тепломассообмена выявить основные признаки процесса переноса теплоты или массы и использовать математический аппарат, который необходим для решения данной конкретной задачи. Поэтому классификация должна быть обязательным элементом любого научного или инженерного исследования. Задачи тепломассообмена можно объединить в разные группы в зависимости от критерия анализа.

Во-первых, трудоемкость решения задачи зависит от *размерности* задачи. Различают нуль-, одно-, дву- или трехмерные постановки задачи. При постановке задачи необходимо учитывать и *систему координат* (декартова, цилиндрическая или сферическая система), в которой записывают уравнения тепломассообмена.

Во-вторых, все задачи тепломассообмена можно разделить на *стационарные* и *нестационарные* в зависимости от того изменяются или нет поля температур и поля концентраций во времени.

В-третьих, задачи тепломассообмена подразделяют на *линейные* и *нелинейные*. В нелинейных задачах тепломассообмена учитывают зависимость физических свойств вещества (плотности, теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности) от температуры и коэффициентов диффузии от концентрации. В нелинейных задачах также учитывают и нелинейный характер условий тепломассообмена на границе тела и нелинейных начальных условий. Точность решения нелинейных задач значительно выше, чем линейных, однако при этом существенно возрастает и сложность реализации алгоритма решения.

В-четвертых, задачи тепломассообмена подразделяют на задачи *внутреннего ТМО*, или *внутренние* задачи, задачи *внешнего ТМО*, или *внешние* задачи и задачи *сопряженного ТМО*, или *сопряженные* задачи.

Внутренними задачами теплообмена называют задачи расчета температурных полей и потоков теплоты в твердых телах, формируемых в процессе теплопроводности. При этом условия теплообмена на границах тела известны. Аналогично *внутренними* задачами массообмена называют задачи расчета полей концентрации и потоков массы в твердых телах, формируемых в процессе молекулярной диффузии. При этом условия массообмена на границах тела известны.

Внешними задачами теплообмена называют задачи расчета температурных полей и потоков теплоты в текучей среде, окружающей твердое тело, в процессе конвективного или лучисто-конвективного теплообмена. При этом условия теплообмена на границах области, занимаемой флюидом, известны. Аналогично *внешними* задачами массообмена называют задачи расчета полей концентрации и потоков массы в текучей среде, окружающей твердое тело, в процессе молекулярной или конвективной диффузии. При этом условия массообмена на границах области, занимаемой флюидом, известны.

Деление задач тепломассообмена на *внешние* и *внутренние* – условная операция, которую выполняют в целях упрощения решения *сопряженной* задачи тепломассообмена. При решении сопряженной задачи тепломассообмена учитывают взаимное влияние внутреннего и внешнего процессов переноса теплоты и массы путем согласования условий тепломассообмена на границе раздела фаз. К *сопряженным* задачам относят

и задачи, учитывающие взаимное влияние процессов переноса теплоты и массы. При наличии в смеси градиентов температуры происходит разделение компонентов смеси по молекулярной массе – возникает термодиффузия (эффект Соре). При наличии массообмена вследствие различия теплоемкостей компонентов смеси возникает диффузионный тепловой поток (эффект Дюфо). К *сопряженным* задачам тепломассообмена также относят задачи расчета совместного протекания тепломассообмена и процессов другой физической природы. Например, взаимное влияние температурных и электромагнитных полей при индукционном нагреве или взаимное влияние температурного поля и поля упругих или пластических деформаций, возникающих при нагреве (охлаждении) или при механическом воздействии на твердое тело.

В-пятых, задачи тепломассообмена подразделяют на *прямые* и *обратные* в зависимости от заданных (входных) и искомых (выходных) параметров.

В *прямых* задачах по заданным условиям однозначности (размерам тела, времени процесса, теплофизическим или диффузионным свойствам, начальному распределению температуры или концентрации, коэффициентам тепло- или массоотдачи на границе данной области) рассчитывают поле температур или поле концентраций и соответственно потоки теплоты или потоки массы.

В *обратных* задачах тепломассообмена по известному из эксперимента температурному полю или полю концентраций определяют (восстанавливают) одно из условий однозначности.

В-шестых, задачи *радиационного* теплообмена в системе твердых тел и газовых объемов в зависимости от входных и выходных параметров подразделяют на *прямые*, *обратные* и *смешанные*.

В *прямых* задачах радиационного теплообмена заданными (входными) параметрами считают температуры твердых поверхностей и газовых объемов, а искомыми (выходными) параметрами – тепловыделения в газовых объемах и результирующие тепловые потоки на твердых поверхностях.

В *обратных* задачах радиационного теплообмена, наоборот, заданными (входными) параметрами считают тепловыделения в газовых объемах и результирующие тепловые потоки на твердых поверхностях, а искомыми (выходными) параметрами – температуры твердых поверхностей и газовых объемов.

В *смешанных* задачах радиационного теплообмена для одних газовых объемов и твердых поверхностей входными параметрами являются температуры, а выходными – тепловыделения и результирующие тепловые потоки; для других газовых объемов и твердых поверхностей, наоборот, заданы тепловыделения или результирующие тепловые потоки, а требуется найти температуры.