

• 2 •

ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

2.1.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА

2.1.1.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Теплообмен характеризуется изменением температуры по координатам пространства и во времени

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (2.1)$$

где x, y, z — координаты пространства; τ — время.

Совокупность значений температуры во всех точках какой-либо пространственной области в данный момент времени называют *температурным полем*. Если температурное поле изменяется во времени, оно называется *нестационарным*, а если не изменяется — *стационарным*.

Точки пространств, имеющие в рассматриваемый момент времени одинаковую температуру и образующие некоторую поверхность, называются *изотермической поверхностью*.

Интенсивность теплообмена характеризуется такими понятиями, как *тепловой поток* и *плотность теплового потока*, или *поверхностный тепловой поток*. Тепловой поток — это количество теплоты, проходящее в единицу времени через некоторую произвольную поверхность Q , Вт (Дж/с). Плотность теплового потока (поверхностный тепловой поток) — это тепловой поток, отнесенный к единице поверхности q , Вт/м²:

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (2.2)$$

где F — площадь поверхности, м², через которую проходит тепловой поток Q .



2.1.2. СПОСОБЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ

Теплопередача или теплообмен — это *необратимый самопроизвольный процесс переноса теплоты* в пространстве с неравномерным распределением температуры. Он происходит вследствие обмена внутренней энергией между отдельными элементами, областями рассматриваемой среды, в ходе которого теплота переходит из ее более нагретых мест в менее нагретые.

Перенос теплоты осуществляется тремя способами: *теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.*

Теплопроводность — это *молекулярный перенос теплоты в пространстве* за счет индивидуального (хаотического, поступательного, колебательного, вращательного) движения частиц, составляющих вещество, в котором происходит теплообмен. Этот процесс возможен в газообразных, жидких и твердых средах.

Конвекция — это *перенос теплоты в пространстве движущимися макрообъемами* жидкости или газа в том или ином направлении. Перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды. Различают *естественную конвекцию*, происходящую естественным путем и вызванную чаще всего разностью плотностей среды в разных ее частях, и *вынужденную конвекцию*, обусловленную действием какого-либо исполнительного механизма (насоса, вентилятора и т. д.).

В технике и в быту часто происходят процессы теплообмена между различными жидкостями (средами), разделенными твердой поверхностью, где совместно действуют конвекция и теплопроводность, и такой теплообмен называется *конвективным теплообменом* или *теплоотдачей.*

Теплообмен излучением — это *теплообмен, обусловленный превращением части внутренней энергии одного вещества в энергию излучения*, переносом ее в пространстве и поглощением другим веществом. В данном случае перенос теплоты в пространстве происходит посредством *электромагнитных волн.*



2.1.3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Основной закон передачи теплоты теплопроводностью — закон Фурье (1822 г.), который устанавливает прямую зависимость поверхностного теплового потока q и температурного градиента:

$$q = -(\lambda \cdot \text{grad } t), \quad (2.3)$$

где λ — коэффициент пропорциональности или теплопроводности, Вт/(м·К), который численно равен тепловому потоку в 1 Вт при градиенте температур в 1 градус через поверхность толщиной в 1 м; $\text{grad } t$ — разность температур двух соприкасающихся поверхностей, град, или вектор, направленный в сторону повышения температур.

Знак *минус* в формуле (2.3) означает встречное направление векторов градиента температур и теплового потока.

Величина λ зависит от температуры, плотности, влажности, материала. Его значения приведены в теплотехнических справочниках, а для строительных материалов — в СП 23-101-2004 (приложение Д).

Наибольшая теплопроводность у металлов, коэффициент теплопроводности которых $\lambda = 3 \dots 450$ Вт/(м·К).

Коэффициент теплопроводности неметаллов (диэлектриков) $\lambda = 0,023 \dots 2,9$ Вт/(м·К), причем меньшие значения характерны для строительных и теплоизоляционных материалов. Для жидкостей $\lambda = 0,07 \dots 0,7$ Вт/(м·К), а для газов $\lambda = 0,006 \dots 0,6$ Вт/(м·К).

В практических расчетах часто встречается случай стационарной теплопроводности в плоской однослойной и многослойной стенке.

Стационарная теплопроводность в плоской стенке. Рассмотрим *плоскую однослойную стенку* толщиной δ , м.

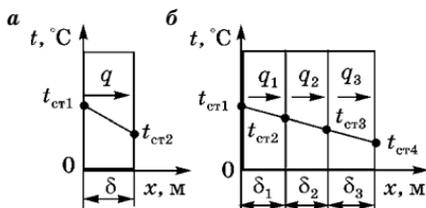


Рис. 2.1
Стационарная теплопроводность в плоской стенке:
a — однослойная стенка; *б* — многослойная стенка (3 слоя).

Одна поверхность стенки имеет температуру $t_{\text{cr1}} = \text{const}$, другая — $t_{\text{cr2}} = \text{const}$, причем $t_{\text{cr1}} > t_{\text{cr2}}$. Поверхностный тепловой поток через стенку q , Вт/м² будет направлен от t_{cr1} к t_{cr2} (рис. 2.1а).

Запишем уравнение (2.3) в следующем виде:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = \text{const.} \quad (2.3a)$$

Решая это уравнение, находим температуру:

$$t = -\left(\frac{q}{\lambda} x\right) + C, \quad (2.4)$$

где C — постоянная интегрирования на границе стенки.

Граничные условия:

- если $x = 0$, то $t = t_{\text{cr1}}$ и $c = t_{\text{cr1}}$;
- если $x = \delta$, то $t = t_{\text{cr2}}$ и $c = t_{\text{cr1}}$.

Тогда

$$t_{\text{cr2}} = -\left(\frac{q}{\lambda} x\right) + t_{\text{cr1}}, \quad (2.5)$$

откуда

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{\text{cr1}} - t_{\text{cr2}}) = \frac{t_{\text{cr1}} - t_{\text{cr2}}}{\delta/\lambda} = \frac{t_{\text{cr1}} - t_{\text{cr2}}}{R_\lambda}, \quad (2.6)$$

$$R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (2.7)$$

где R_λ — термическое сопротивление плоской однослойной стенки (слоя), м²К/Вт.

Из уравнения (2.5) следует, что в плоской однородной стенке при стационарной теплопроводности температура распределяется по линейному закону, причем угловой коэффициент прямой линии равен δ/λ и определяет интенсивность падения температуры.

Схема стационарной теплопроводности в плоской многослойной стенке показана на рис. 2.1б. Для этого случая на основе закона Фурье можно записать следующее уравнение для поверхностного теплового потока:

$$q = \frac{t_{\text{cr1}} - t_{\text{crn+1}}}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda i}} = \frac{t_{\text{cr1}} - t_{\text{crn+1}}}{R_\lambda}, \quad (2.8)$$

$$R_{\lambda} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \quad (2.9)$$

$$Q = qF, \quad (2.10)$$

где t_{cr1} , t_{crn+1} — температуры на поверхностях стенки; n — число слоев стенки; δ_i — толщина i -го слоя стенки, м; λ_i — коэффициент теплопроводности i -го слоя стенки, Вт/(м·К); $R_{\lambda i}$ — термическое сопротивление i -го слоя стенки, (м²·К)/Вт; R_{λ} — полное термическое сопротивление многослойной стенки, (м²·К)/Вт; q — тепловой поток, Вт; F — площадь поверхности стенки, м².

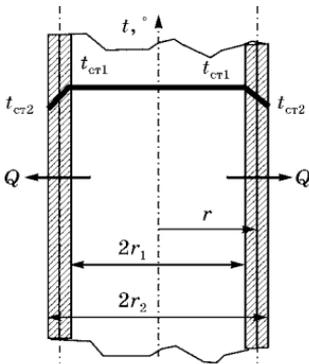


Рис. 2.2
Стационарная теплопроводность в цилиндрической стенке

Стационарная теплопроводность в цилиндрической стенке. Этот случай теплопроводности также часто встречается при расчетах тепловых потоков через цилиндрические корпуса обогреваемых или охлаждаемых аппаратов, через стенки трубопроводов и наложенный на них слой теплоизоляции и т. д.

На рис. 2.2 показана схема стационарной теплопроводности в неограниченной стенке, имеющей внутренний диаметр $d_1 = 2r_1$ и наружный диаметр $d_2 = 2r_2$. На внутренней поверхности стенки поддерживается температура $t_{cr1} = \text{const}$, а на наружной — $t_{cr2} = \text{const}$, причем $t_{cr1} > t_{cr2}$.

Под действием температурного перепада возникает постоянный тепловой поток $q = \text{const}$, направленный по радиусу цилиндра.

Рассматривая этот процесс на основе закона Фурье, получаем уравнение для теплового потока

$$Q = \frac{2\pi\lambda \ell}{\ln(d_2/d_1)} (t_{cr1} - t_{cr2}), \quad (2.11)$$

где ℓ — длина стенки, м.

При расчете через однослойную стенку часто используется понятие *линейной плотности теплового потока* q_ℓ , за которую принимается величина $q_\ell = Q/\ell$.

Тогда уравнение (2.11) запишем в следующем виде:

$$q_\ell = \frac{t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}}{\frac{1}{2\pi\ell} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}}{R_{\lambda\ell}}, \quad (2.12)$$

$$R_{\lambda\ell} = \frac{1}{2\pi\ell} \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (2.13)$$

где $R_{\lambda\ell}$ — линейное термическое сопротивление теплопроводности однослойной цилиндрической стенки, ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт.

Для многослойной цилиндрической стенки уравнение (2.12) примет следующий вид:

$$q_\ell = \frac{t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}}{\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\ell}{d_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} = \frac{t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda\ell i}}, \quad (2.14)$$

где $R_{\lambda\ell i}$ — термическое сопротивление для i -го слоя, ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт.

Из уравнений (2.11)–(2.13) стационарной теплопроводности через цилиндрическую стенку видно, что распределение температуры по радиусу в пределах слоя происходит по *логарифмическому закону*.

При $d_2/d_1 \leq 1,5$ кривизной стенки можно пренебречь и использовать формулу (2.6) для плоской стенки, полагая, что $\delta = R_2 - R_1$ и $F = 2\pi\ell(r_1 + r_2)$, тогда формула (2.10) примет вид

$$Q = q_\ell F = \frac{\lambda}{r_1 - r_2} (t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}) F. \quad (2.15)$$

При этом погрешность не превысит 1,5%.

2.1.4. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Часто встречается разновидность конвективного теплообмена — *теплоотдача*. Поверхность раздела, участвующая в теплоотдаче, называется *поверхностью теплообмена* или *теплоотдающей поверхностью*.

