

ЛЕКЦИЯ 11

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЧЕРЕЗ ПЛОСКИЕ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ СТЕНКИ ИЗЛУЧЕНИЕ. РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Теплопроводность плоской стенки

Рассмотрим стационарный перенос теплоты через бесконечную плоскую стенку постоянной толщины δ . Механизм переноса – теплопроводность.

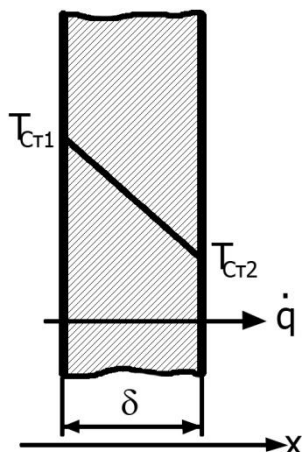


Рис.11.1. Распределение температур в плоской стенке

Примем, что на поверхностях плоской стенки поддерживаются постоянные температуры T_{Cm1} и T_{Cm2} , причем $T_{Cm1} > T_{Cm2}$. Тепловой поток q направлен по оси x .

Внесем соответствующие изменения в дифференциальное уравнение теплопроводности в неподвижной среде:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (10.28)$$

Температура изменяется только по оси x , поэтому:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad - \quad (11.1)$$

Тогда

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (11.2)$$

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad (11.3)$$

$$T = C_1 x + C_2 \quad (11.4)$$

Уравнение (11.4) – это уравнение прямой, следовательно, температура в плоской стенке изменяется по линейному закону.

Константы интегрирования C_1 и C_2 можно найти из граничных условий:

$$x = 0, T = T_{Cm1}, C_2 = T_{Cm1}$$

$$x = \delta, T = T_{Cm2}, T_{Cm2} = C_1 \cdot \delta + T_{Cm1}$$

Получим выражение для C_1 :

$$C_1 = (T_{Cm2} - T_{Cm1}) / \delta \quad (11.5)$$

Тогда уравнение прямой, описывающее распределение температур в плоской стенке будет иметь вид:

$$T = -\frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\delta} x + T_{Cm1} \quad (11.6)$$

По этому уравнению можно рассчитать температуру в любой точке плоской стенки.

Запишем уравнение Фурье для расчета теплопроводности через плоскую стенку:

$$q = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial n} \quad (11.7)$$

В данном случае:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial x} = C_1 = -\frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\delta}, \quad (11.8)$$

тогда

$$q = \lambda_T \frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\delta} \quad (11.9)$$

Или для общего количества передаваемой теплоты:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_T}{\delta} A (T_{Cm1} - T_{Cm2}) \quad (11.10)$$

Уравнение описывает перенос теплоты теплопроводностью в однослойной плоской стенке в стационарном режиме.

Отношение λ_T / δ называют тепловой проводимостью стенки.

Теплопроводность многослойной плоской стенки

Рассмотрим процесс стационарной теплопроводности через трехслойную плоскую стенку. Слои различной толщины ($\delta_1, \delta_2, \delta_3$) прилегают друг к другу и имеют различные

значения коэффициентов теплопроводности (λ_{T1} , λ_{T2} , λ_{T3}). Поскольку процесс стационарный, то $q = \text{const}$, и направлен по оси x .

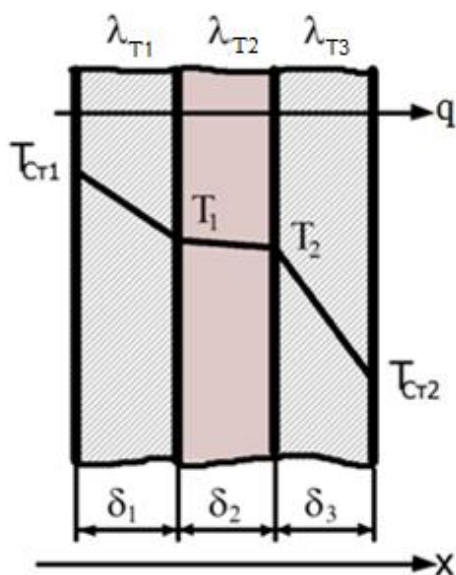


Рис.11.2. Распределение температур в многослойной плоской стенке

Примем на поверхностях внешних плоскостях постоянные температуры T_{Cm1} и T_{Cm2} , причем $T_{Cm1} > T_{Cm2}$, между слоями температуры T_1 и T_2 .

Запишем уравнение переноса тепла через каждый слой.

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (T_{Cm1} - T_1) \quad (11.11)$$

$$q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (T_1 - T_2) \quad (11.12)$$

$$q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (T_2 - T_{Cm2}) \quad (11.13)$$

Перепишем эти уравнения относительно разности температур:

$$T_{Cm1} - T_1 = q \frac{\delta_1}{\lambda_1} \quad (11.14)$$

$$T_1 - T_2 = q \frac{\delta_2}{\lambda_2} \quad (11.15)$$

$$T_2 - T_{Cm2} = q \frac{\delta_3}{\lambda_3} \quad (11.16)$$

Сложим уравнения (11.14)÷(11-16):

$$T_{Cm1} - T_1 + T_1 - T_2 + T_2 - T_{Cm2} = q \frac{\delta_1}{\lambda_1} + q \frac{\delta_2}{\lambda_2} + q \frac{\delta_3}{\lambda_3} = q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)$$

$$\text{Тогда: } q = \frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (11.17)$$

Величины: $\frac{\delta_i}{\lambda_i}$ - термические сопротивления отдельных слоёв составляющих многослойную стенку.

Уравнение теплопроводности плоской стенки при установившемся процессе теплообмена будет иметь вид:

$$\dot{Q} = A \frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = A \frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\sum_i^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (11.18)$$

В каждом слое по толщине температура изменяется линейно, в целом, профиль температур имеет вид ломаной линии, причем $\lambda_{T_2} > \lambda_{T_1} > \lambda_{T_3}$.

Теплопроводность однослойной цилиндрической стенки

Рассмотрим установивший процесс передачи теплоты теплопроводностью в однородной цилиндрической стенке длиной l и толщиной δ внутренним радиусом $r_{вн}$ и наружным радиусом $r_{н}$. Температуры на внутренней и внешней сторонах цилиндра постоянны и равны, соответственно, T_{Cm1} и T_{Cm2} , причем $T_{Cm1} > T_{Cm2}$. Поскольку $l \gg \delta$, будем считать, что температура изменяется только в радиальном направлении.

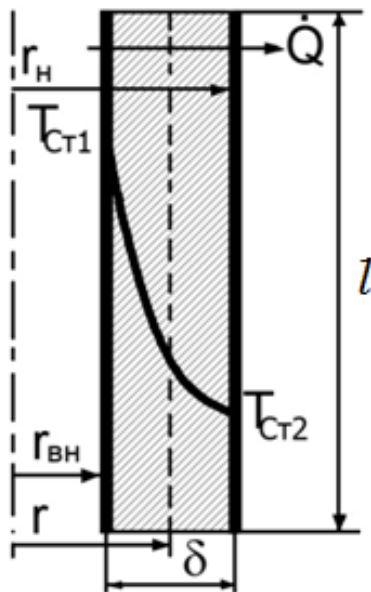


Рис.11.3. Распределение температур в цилиндрической стенке.

Запишем уравнение Фурье для переноса тепла теплопроводностью через поверхность произвольного радиуса r :

$$\dot{Q} = -\lambda_T A \frac{\partial T}{\partial n} = -2\pi r l \lambda_T \frac{\partial T}{\partial r} \quad (11.19)$$

Разделим переменные и проинтегрируем данное уравнение:

$$\int_{r_{вн}}^{r_{н}} \frac{dr}{r} = -\lambda_T \frac{2\pi l}{\dot{Q}} \int_{T_{Cm2}}^{T_{Cm1}} dT, \quad (11.20)$$

$$\ln \frac{r_{н}}{r_{вн}} = \ln \frac{d_{н}}{d_{вн}} = \lambda_T \frac{2\pi l}{\dot{Q}} (T_{Cm1} - T_{Cm2}) \quad (11.21)$$

$$\dot{Q} = \frac{2\pi l \lambda_T}{\ln \frac{d_{н}}{d_{вн}}} (T_{Cm1} - T_{Cm2}) \quad (11.22)$$

Где $d_{н}/d_{вн}$ – отношение наружного диаметра цилиндрической стенки к внутреннему диаметру.

Уравнение (11.22) показывает, что по толщине цилиндрической стенки, температура изменяется по логарифмическому закону.

Это связано с тем, что с увеличением радиуса увеличивается поверхность, через которую переносится теплота, т.е. удельный тепловой поток $q = \dot{Q}/A$ уменьшается с увеличением радиуса.

Для многослойной цилиндрической стенки можно получить зависимость для теплового потока по аналогии с многослойной плоской стенкой. Тогда, для установившегося процесса теплопроводности в многослойной стенке, состоящей из n

слоев, тепловой поток \dot{Q} равен:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi l}{\sum_i^n \frac{1}{\lambda_{Ti}} \ln \left(\frac{d_{н}}{d_{вн}} \right)_i} (T_{Cm1} - T_{Cm2}) \quad (11.23)$$

В случае тонких стенок, которыми можно считать стенки с $d_{н}/d_{вн} < 2$, расчет с достаточной степенью точности проводят по уравнению переноса теплоты в плоских стенках. В качестве поверхности теплообмена в этом случае рекомендуется брать среднюю поверхность A , рассчитанную при среднем диаметре стенки: $d_{cp} = (d_{н} + d_{вн})/2$.

Коэффициенты теплопроводности газов, жидкостей, твердых тел.

Перенос тепла теплопроводностью описывает закон Фурье:

$$q = -\lambda_T \text{ grad}T$$

Коэффициентом пропорциональности здесь выступает коэффициент теплопроводности λ_T , показывающий какое количество теплоты проходит вследствие теплопроводности в единицу времени через единицу поверхности теплообмена при градиенте температур в 1 градус. Размерность λ_T в системе СИ Вт/(м·К).

Величина λ_T зависит от природы вещества, его структуры, температуры и пр.

Хорошими проводниками являются металлы, плохими - газы и пары.

Наибольшую теплопроводность показывают графитовые материалы, у графена она порядка 5000 Вт/(м.град), у алмаза может достигать 2300 Вт/(м·К). У золота чуть более 300 Вт/(м.град), у железа и сталей около 50 Вт/(м·К)

В жидкостях - коэффициент теплопроводности порядка 0,1 ÷ 0,7 Вт/(м·К), в газах - 0,006 ÷ 0,175 Вт/(м·К).

Низкая теплопроводность теплоизоляционных материалов объясняется их пористостью, в порах содержится воздух, теплопроводность которого находится около 0,027 Вт/(м·К).

Для газов коэффициенты теплопроводности λ_T при увеличении температуры растут, а от давления зависят незначительно. Для большинства жидкостей λ_T с увеличением температуры падают. Исключение составляет вода, коэффициент теплопроводности которой с увеличением температуры до 130 °С немного возрастает, а затем, при дальнейшем повышении температуры, начинает падать.

Для большинства чистых металлов коэффициенты теплопроводности λ_T с ростом температуры уменьшаются. Наличие примесей в металлах значительно снижает их теплопроводность.

Перенос тепла излучением

Перенос теплоты излучением осуществляется за счет электромагнитных волн. Основную долю тепла переносят волны инфракрасного спектра излучения длиной 0,8 - 800 мкм. Возникновение "тепловых лучей" определяется температурой и оптическими свойствами излучающего тела. Явление распространения тепловых лучей называют тепловым излучением.

Любое тело с температурой выше 0 К излучает электромагнитные волны.

Тепловое излучение характеризуется лучеиспускательной способностью тела E (Вт/м²), т.е. количеством теплоты Q , излучаемой телом во всем интервале длин волн в единицу времени с единицы поверхности:

$$E = \frac{Q}{At} \quad (11.24)$$

где Q - количество теплоты, излучаемое телом, Дж; A - поверхность тела, м; t - длительность процесса излучения, с.

Согласно закону Стефана-Больцмана лучеиспускательная способность абсолютно черного тела E_0 пропорциональна его абсолютной температуре в четвертой степени:

$$E_0 = k_0 T^4, \quad (11.25)$$

где k_0 - константа лучеиспускания абсолютно черного тела, $k_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴)

Для удобства пользования закон Стефана-Больцмана применяют в виде:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (11.26)$$

где C_0 - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, $C_0 = 5,67$ Вт/(м²К⁴).

Для других тел, отличных от абсолютно черного, т.е. "серых", закон запишется как:

$$E_0 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (11.27)$$

где $\varepsilon = \frac{C}{C_0}$ - относительный коэффициент лучеиспускания или степень черноты тела.

Степень черноты определяется природой материала и шероховатостью поверхности.

В расчетах обычно требуется знать, сколько теплоты будет передаваться от более нагретого тела с температурой T_1 к менее нагретому с температурой T_2 .

$$\dot{Q} = C_{1-2} A \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \varphi \quad (11.28)$$

где A - поверхность излучающего тела, с большей температурой, C_{1-2} - коэффициент взаимного излучения, φ - угловой коэффициент, определяемый формой, размерами и взаимным расположением участвующих в теплообмене поверхностей.

Формулы расчета коэффициента взаимного излучения C_{1-2} приводятся в справочниках, например:

* две плоскости, параллельные одна другой $\varphi = 1$:

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}}; \quad (11.29)$$

* излучающее тело (с большей температурой) заключено внутри другого тела (например, нагретый котел в цехе) $\varphi > 1$:

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)}, \quad (11.30)$$

$C_1 = \varepsilon_1 C_0$ - коэффициент излучения горячего тела (с большей температурой T_1),

$C_2 = \varepsilon_2 C_0$ - коэффициент излучения холодного тела (с меньшей температурой T_2).

Если требуется ослабить лучистый теплообмен, между телами устанавливаю отражающие перегородки - экраны.

Лучеиспускание газов

Излучение газов отличается от излучения твердых тел. Газы излучают объемом, а твердые тела поверхностью. В отличие от твердых тел газы излучают в строго фиксированном диапазоне длин волн.

Одноатомные и большинство двухатомных газов - диатермичны, т.е. прозрачны для тепловых лучей.

Хотя излучающая способность газов не пропорциональна T^4 , в технических расчетах принимают, что газы подчиняются закону Стефана-Больцмана, а отклонение учитывают соответствующей степенью черноты газа.

Промышленные газы часто бывают запылены. Частицы пыли обладают значительной поверхностью и собственным спектром излучения. Это приводит к значительному возрастанию теплового потока излучения газа.

Расчет толщины тепловой изоляции

Для того, чтобы снизить теплотери аппаратами и трубопроводами в окружающую среду, на наружные поверхности наносят теплоизоляцию.

Теплоизоляцией называют внешнее вспомогательное покрытие, служащее снижению потери теплоты. Теплоизоляция нужна для экономии топлива, поддержания стабильного теплового режима в промышленных аппаратах и соблюдения санитарных норм.

Для теплоизоляции применяют материалы с низкой теплопроводностью. В промышленности для этого применяют: шлаковую и минеральную вату, совелит,

асбозурит, асбест, асбослюда и прочие, т.е. материалы, имеющие коэффициент теплопроводности при температурах 50-100 °С меньше 0,2 Вт/м·К.

Основную теплоизолирующую роль в изоляции играет воздух. Задача состоит в снижении циркуляционных потоков в слое теплоизоляции. Снаружи теплоизоляцию покрывают специальными составами или фольгой.

При выборе теплоизоляции необходимо учитывать способность материала поглощать влагу и выдерживать соответствующую температуру. Для изоляции очень горячих поверхностей может применяться многослойная теплоизоляция. На нагретые поверхности накладывается слой термостойкого материала, например, асбеста, а уже поверх него настиляется слой минеральной ваты и т.д. При теплоизоляции аппаратов, находящихся в сырых помещениях, необходимо подбирать специальные негигроскопичные материалы, т.к. при насыщении влагой изоляционная способность материала снижается.

При расчете теплоизоляции сначала устанавливают допустимые тепловые потери, они не должны превышать 3-5 % от тепловой нагрузки аппарата. Затем подбирают вид теплоизоляции и задаются температурой наружной поверхности, отвечающей санитарным нормам:

1) для изолируемых поверхностей, расположенных в рабочей или обслуживаемой зоне помещений:

- 45 °С - при температуре теплоносителя выше 100 °С;
- 35 °С - при температуре теплоносителя до 100 °С; для поверхностей оборудования и трубопроводов, содержащих вещества с температурой вспышки паров не выше 45 °С;

2) для изолируемых поверхностей, расположенных на открытом воздухе:

- 60 °С - на открытом воздухе при штукатурном или неметаллическом покровном слое;
- 55 °С - при металлическом покровном слое.

Температуру на внутренней поверхности теплоизоляции можно принять равной температуре на внутренней поверхности стенки аппарата, т.е. пренебречь термическим сопротивлением металлической стенки с высоким коэффициентом теплопроводности λ_T .

Тепловой поток (в данном случае тепловые потери) в установившемся процессе одинаков и для слоя теплоизоляции и для теплоотдачи в воздухе. Тогда:

$$\dot{q}_{nom} = \frac{\lambda_{uz}}{\delta_{uz}} (T_{ann} - T_{cm}) = \alpha_{обш} (T_{cm} - T), \quad (11.31)$$

где \dot{q}_{nom} - удельные тепловые потери, Вт/м²,

$\lambda_{из}$ - коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала, Вт/м·К,

$\delta_{из}$ - толщина слоя теплоизоляции, м,

$\alpha_{общ}$ - общий коэффициент теплоотдачи в окружающую среду конвекцией и излучением. Его можно определить по формуле Линчевского в интервале температур 30-350 °С:

$$\alpha_{общ} = 9,3 + 0,058T_{см} , \quad (11.32)$$

$T_{анн}$ - температура внутри аппарата, она же температура внутренней поверхности теплоизоляции, °С.

$T_{см}$ - температура наружной поверхности слоя теплоизоляции, °С,

T - температура наружного воздуха.

Решая данную систему уравнений с ограничениями максимальных потерь тепла и ограничением на температуру наружной поверхности $T_{см}$, находят толщину слоя теплоизоляции $\delta_{из}$.