

**ТЕПЛОПЕРЕДАЧА .
АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МАТЕРИАЛОВ**

Тема 1. Теплопередача. Основные понятия и определения. Теплопроводность через одно- и многослойную плоские стенки.

Вопросы:

1. Понятие о теплотехнике и принципиальных направлениях использования теплоты.
2. Теплопроводность, понятие о температурном поле, градиенте, потоке.
3. Стационарная теплопроводность однородной однослойной плоской стенки. Граничные условия первого рода.
4. Стационарная теплопроводность многослойной плоской стенки. Граничные условия первого рода.

1. Теплотехника - наука изучающая методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принцип действия и конструктивные особенности теплопарогенераторов и тепловых машин, аппаратов, устройств. Различают два принципиально различных направления использования теплоты: *энергетическое и технологическое*. При *энергетическом* использовании теплота преобразуется в механическую энергию, при *технологическом* теплота направлена на изменение агрегатного состояния вещества, физико-механических и химических свойств.

Теоретическими разделами теплотехники, изучающими закономерности превращения тепловой энергии и процессы распространения теплоты являются техническая **термодинамика и теория теплообмена**.

Теория теплообмена представляет собой науку, которая изучает законы распространения и передачи тепла между телами. Различают три вида теплообмена: 1) **теплопроводность (кондукция)** - перенос теплоты осуществляется при непосредственном соприкосновении частиц тела;

2) в подвижных системах (газ, жидкость) передача теплоты может осуществляться при перемешивании между собой частиц разной степени нагретости, т.е. **конвекцией**

3) лучеиспусканием - тепловым излучением за счет электромагнитных волн. На поверхности поглощающего тепло тела излучение превращается в тепловую энергию

В целом явление передачи теплоты методом конвекции от подвижных систем (газа, жидкости) при соприкосновении со стенкой путем теплопроводности и обратный процесс носят название конвективного **теплообмена или теплоотдачи.**

В тепловых агрегатах все эти процессы протекают одновременно.

2. Процесс распространения теплоты в пространстве непрерывно связан с распределением температур в нем. Совокупность значений температуры в каждый момент времени для всех точек рассматриваемого пространства называется **температурным полем**, которое математически выражается уравнением **$t = f(x, y, z, \tau)$** x, y, z , - координаты точки, τ - время. Если температура во времени не изменяется, то поле называется установившимся, или **стационарным**.

Если температура во времени изменяется, то поле называется неустановившимся, или **нестационарным**. Температурное поле может быть функцией одной, двух, трех координат и соответственно оно называется одно-, двух-, трехмерным. **Одномерное стационарное поле имеет уравнение $t = f(x)$** . Все точки пространства, имеющие одинаковую температуру, образуют **изотермическую поверхность**. Изменение температуры в телах наиболее интенсивно происходит в направлении перпендикулярном изотермическим поверхностям.

Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn при условии, что $\Delta n \rightarrow 0$, называется **температурным градиентом**

$$\lim \left[\frac{\Delta t}{\Delta n} \right]_{\Delta n \rightarrow 0} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t$$

Количество теплоты, переносимой в единицу времени называется **тепловым потоком Q** Дж/с (Вт). Q , отнесенное к единице поверхности, называется плотностью теплового потока

$$q = Q/S \text{ (Вт/м}^2\text{)}.$$

Исследуя явление теплопроводности **Фурье**

установил $Q = -\lambda S \frac{\partial t}{\partial n}$ или $q = -\lambda \text{grad}t$ **[1.1]** ;

где λ - коэффициент теплопроводности Вт/(м.К), определяет мощность теплового потока, проходящего через 1 м² при градиенте температуры 1 К/м. Теплопроводность для теплоизоляционных материалов **< 0,175 Вт/(м.К).**

С ростом пористости и уменьшением размера пор теплопроводность снижается. Наличие открытых пор в гидрофильных материалах приводит к повышению теплопроводности.

3. Теплопроводность плоской стенки в стационарном режиме.

При рассмотрении уравнения 1.1 для бесконечно тонкого слоя dx , взятого на расстоянии x от поверхности, будем иметь $q = -\lambda (dt/dx)$ или $dt = -(q dx)/\lambda$ и $t = -(qx)/\lambda + C$.

Постоянная интегрирования C определяется из граничных условий: при $x=0$; $t=t_1$, $C=t_1$, при $x=\delta$ $t=t_2 = [-(q\delta)/\lambda] + t_1$; откуда плотность теплового потока $q = [\lambda(t_1 - t_2)]/\delta$. [1.2]

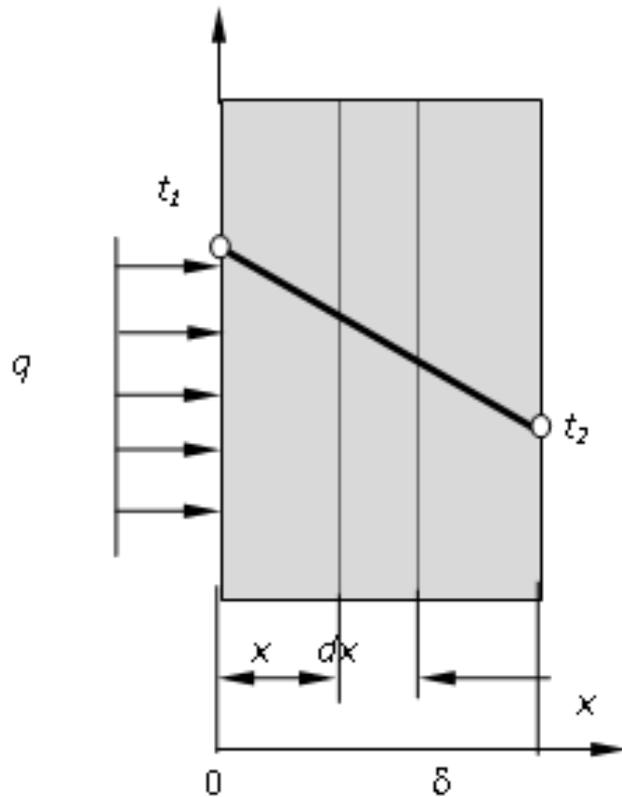


Рис. 1.1 Стационарная теплопроводность однородной однослойной плоской стенки. Граничные условия первого рода

В стационарном режиме на поверхностях стенки постоянно поддерживаются температуры t_1 и t_2 . Температурное поле одномерно и меняется в направлении x .

Теплопроводность стенки λ - постоянна. Источники теплоты внутри стенки отсутствуют. Разность температур $(t_1 - t_2) = \Delta t$ называется температурным напором. Отношение λ/δ , Вт/м²·К называют тепловой проводимостью стенки, показывающей, какое количество теплоты проводит 1 м² стенки за единицу времени при температурном напоре, равном одному градусу. Обратная величина $R = (\delta/\lambda)$, К·м²/Вт называется термическим сопротивлением. Если в уравнение $t = -(qx)/\lambda + C$ подставить $C = t_1$ и $q = (\lambda \cdot \Delta t)/\delta$, то получим **уравнение температурной кривой** $t_x = t_1 - (\Delta t \cdot x)/\delta$ [1.3]. Это уравнение показывает, что при постоянном значении λ внутри однородной плоской стенки температура изменяется по закону прямой линии. Общее количество теплоты, переданное через стенку в стационарном режиме

$$Q = qS\tau = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t S \tau \quad [1.4]$$

4. Теплопроводность многослойной плоской стенки в стационарном режиме.

Многослойная плоская стенка состоит, например, из трех слоев, $Q = qS\tau = \frac{\Delta t S \tau}{\delta}$ [1.4] которые плотно прилегают друг к другу и имеет соответствующие толщины и теплопроводности. Известны температуры на внешних поверхностях многослойной стенки. t_1 ; t_4 температуры соприкасающихся слоев t_2 ; t_3 не известны. На основании формулы [1.2] для каждого слоя можно написать $q = [\lambda_1 (t_1 - t_2)]/\delta_1$; $q = [\lambda_2 (t_2 - t_3)]/\delta_2$; $q = [\lambda_3 (t_3 - t_4)]/\delta_4$; После соответственного сложения правых с правыми и левых с левыми частей этих уравнений получим $t_1 - t_4 = \Delta t = q[\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3]$,

откуда $q = \Delta t / (\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3)$ [1.5]

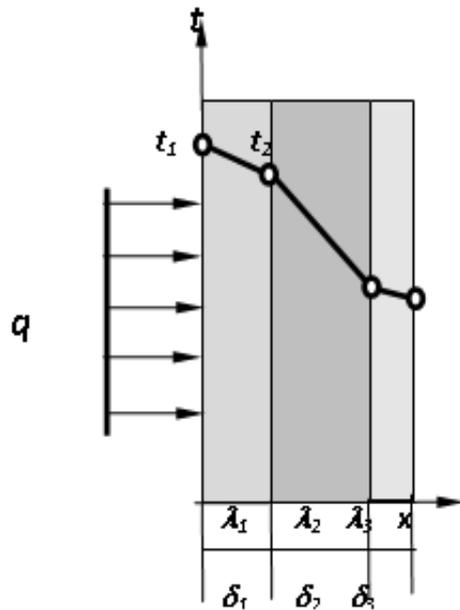


Рис. 1.2 Стационарная теплопроводность многослойной плоской стенки. Граничные условия первого рода

В общем виде для n - слойной стенки можно записать $q = \Delta t / (\sum \delta_i / \lambda_i)$. [1.6]

Для каждого слоя определяются температуры

$$t_2 = t_1 - q\delta_1/\lambda_1 ; \quad t_3 = t_2 - q\delta_2/\lambda_2 ;$$

$$t_3 = t_1 - q(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2) = t_4 + q\delta_3/\lambda_3 ;$$

Внутри каждого слоя температура изменяется по закону прямой линии. В некоторых случаях многослойную стенку рассматривают как однослойную с такой же толщиной $\Delta = \delta_i$. При этом в расчет вводится эквивалентная теплопроводность, определяемая по формуле $\lambda_{\text{эkv}} = \Delta / (\delta_i / \lambda_i)$ [1.7]

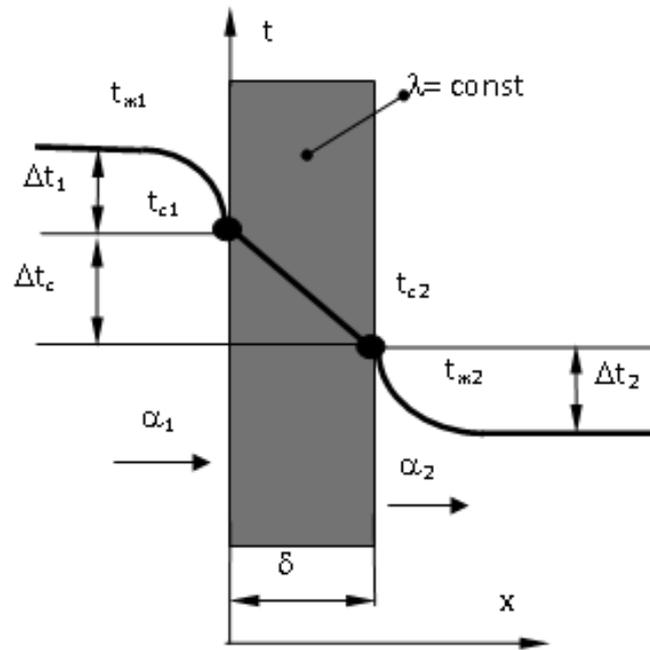
Тема 2. Основы теории теплопередачи

Вопросы:

1. Теплопередача через однослойную плоскую стенку в стационарном режиме.
2. Теплопередача через однослойную цилиндрическую стенку в стационарном режиме.
3. Теплопередача для шаровой стенки.

1. Теплопередача через однослойную плоскую стенку в стационарном режиме.

При решении задач тепловых процессов, происходящих в тепловых агрегатах промышленности производства реализуются тепловые процессы в граничных условиях третьего рода. **Передача теплоты из одной среды (жидкости или газа) к другой через разделяющую их однослойную или многослойную стенку называется теплопередачей.** Теплопередача включает в себя теплоотдачу от более горячей жидкости (газа) к стенке, теплопроводность в стенке, теплоотдачу от стенки к более холодной среде.



Плоская однородная стенка имеет толщину δ с теплопроводностью λ , заданы температуры окружающей среды $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$, а также коэффициенты теплоотдачи α_1 , α_2 . Считаем, что эти величины постоянны и не меняются вдоль поверхности. Это позволяет рассматривать изменение температуры жидкости (газа) и

стенки только в направлении перпендикулярном поверхности. Плотность теплового потока от горячей жидкости к стенке определяется уравнением $q = \alpha_1 (t_{ж1} - t_{c1})$ [1], при стационарном режиме та же плотность теплового потока, обусловленная теплопроводностью через стенку $q = \frac{\delta}{\lambda} (t_{c1} - t_{c2})$ [2], тот же тепловой поток передается от второй поверхности к холодной жидкости за счет теплоотдачи $q = \alpha_2 (t_{c2} - t_{ж2})$ [3]. Уравнения [1] - [3] можно записать в виде $q \frac{1}{\alpha_1} = (t_{ж1} - t_{c1})$ [1]; $q \frac{\lambda}{\delta} = (t_{c1} - t_{c2})$ [2]; $q \frac{1}{\alpha_2} = (t_{c2} - t_{ж2})$ [3].

После сложения правых и левых частей получим $q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = (t_{ж1} - t_{ж2})$ [4] или $q = (t_{ж1} - t_{ж2}) / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$ обозначим $k = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$; тогда $q = k (t_{ж1} - t_{ж2})$. Величина k имеет ту же размерность, что и α , и называется коэффициентом теплопередачи. Коэффициент теплопередачи характеризует интенсивность передачи теплоты от одной жидкости к другой через разделяющую стенку и численно равен количеству теплоты, которое передается через единицу поверхности стенки в единицу времени при разности температур между жидкостями в один градус.

Величина обратная коэффициенту теплопередачи, называется

полным термическим сопротивлением $R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$ [4].

Общее термическое сопротивление складывается из термических сопротивлений теплоотдачи и термического сопротивления теплопроводности стенки. Если стенка состоит из нескольких слоев, то в общем виде **термическое сопротивление** будет

определяться по формуле $R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}$ [5]

Исходя из представленных расчетов и формул для многослойной стенки, в общем виде **температура на границе любых двух слоев i и $i+1$** при граничных условиях третьего рода может быть

определена по уравнению $t_{c(i+1)} = t_{ж1} - q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)$

2. Теплопередача через однослойную цилиндрическую стенку в стационарном режиме.

Рассмотрим неограниченную цилиндрическую стенку с толщиной $\delta = r_2 - r_1$, заданы температуры теплоносителей t_1 и t_2 (причем $t_1 > t_2$); коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 на поверхностях стенки со стороны горячего и холодного теплоносителей. Напишем уравнение для линейной плотности теплового потока $q_l = \alpha_1 (t_1 - t'_c) 2\pi r_1$;

$$q = \lambda 2\pi \frac{t'_c - t''_c}{\ln(r_2 / r_1)} \quad ; \quad q_l = \alpha_2 (t''_c - t_2) \pi r_2.$$

Складываем эти уравнения и решаем относительно разности температур, получаем

$$t_1 - t_2 = q/l \left(\frac{1}{\alpha_1 2\pi r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 2\pi r_2} \right)$$

откуда: $q/l = (t_1 - t_2) : \left(\frac{1}{\alpha_1 \pi d_1} + \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_2} \right)$

[6] Обозначим:

$$kl = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1 2\pi r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 2\pi r_2} \right) \quad [7]$$

Величину kl называют *линейным коэффициентом теплопередачи*. Величина обратная kl называется полным термическим сопротивлением стенки

$$Rl = 1/kl = \frac{1}{\alpha_1 2\pi r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 2\pi r_2} \quad \text{или}$$

$$Rl = \frac{1}{\alpha_1 \pi d_1} + \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_2} = Rl_{,1} + Rl_c + Rl_{,2} \quad [8]$$

Для **многослойной цилиндрической стенки** термическое сопротивление

определится по формуле $R_{lc}^{mn} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\pi \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$

Из формулы видно, что при постоянном d_1 с увеличением d_2 увеличивается термическое сопротивление R_{lc} , но уменьшается термическое сопротивление со стороны холодного теплоносителя $R_{l,2}$.

Такая, двойного характера, зависимость полного термического сопротивления цилиндрической стенки означает, что существует значение d_2 при котором R_l имеет экстремальное значение. Приравняв

первую производную нулю получим: $\frac{dR_l}{d(d_2)} = \frac{1}{2\lambda d_2} - \frac{1}{\alpha_2 d_2^2} = 0$

; получим $d_2 = 2\lambda / \alpha_2$ [9] Значению d_2 из уравнения [8]

соответствует минимальное значение теплового сопротивления R_l . Это значение диаметра называется критическим. При увеличении наружного диаметра до $d_{кр}$ тепловые потери растут. .

Для уменьшения тепловых потерь изолированным трубопроводом необходимо, чтобы наружный диаметр теплоизоляции был больше $d_{кр}$.

3. Теплопередача для шаровой стенки

При граничных условиях третьего рода) уравнение теплопередачи будет

$$Q = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}} \quad [10]$$

Уравнение теплопроводности для многослойной стенки

$$Q = \frac{4\pi(t_{c1} - t_{c2})}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\lambda} \frac{r_{i+1} - r_i}{r_i r_{i+1}}} \quad [11]$$

где r_i и r_{i+1} - меньший и больший радиус i - того слоя шаровой стенки.

Тема 3. Лучистый теплообмен, теоретические основы

Вопросы: **1. Общие понятия лучистого теплообмена.**

Диапазон длин волн. Лучистый поток, коэффициенты отражения, поглощения, пропускания. Характеристика тел (белое, черное, серое, цветное, диатермичное).

2. Законы Кирхгофа, Вина, Больцмана.

3. Схема передачи тепла излучением. Полное количество энергии, излучаемой абсолютно черным телом.

4. Лучистый теплообмен между телами. Количество энергии, передаваемой от одного тела к другому. Формула Михеева.

1. Общие понятия лучистого теплообмена.

При высоких температурах в тепловых агрегатах, где имеются большие пламенные пространства, лучистый теплообмен по своей интенсивности превосходит другие виды теплообмена. Спектр теплового излучения охватывает диапазон длин волн λ от 0,4 до 0,8 мкм (световые лучи) и от 0,8 мкм до 800 мкм (инфракрасные лучи). Все законы оптики распространяются как на световые, так и на инфракрасные волны. **Единицей измерения лучистой энергии служит джоуль.** Количество энергии, излучаемой единицей поверхности тела в единицу времени, называется плотностью излучения - **E** (Вт/м²). Лучистый поток **$Q = ES$** - общее количество энергии, излучаемое телом в единицу времени. Часть лучистого потока отражается **QR** , часть потока **QA** - поглощается часть лучистого потока **QD** проходит сквозь тело. Общий поток.

равен $Q = Q_R + Q_A + Q_D$. Если обозначить $Q_R / Q = R$, $Q_A / Q = A$, $Q_D / Q = D$, то $A + D + R = 1$

Величины R , A , D носят соответственно названия коэффициентов отражения, поглощения, пропускания. При $R=1$ вся энергия отражается - **тело абсолютно белое**. При $A=1$ все лучи поглощаются - **тело абсолютно черное**. При $D=1$ - все лучи проходят, **тело абсолютно прозрачное (диатермичное)**. Полированная поверхность металлов имеет $R = 0,97$, **нефтяная сажа, снег, бархат, лед имеют $A = 0,95-0,97$** , двухатомные газы: кислород, водород, азот имеют $D = 1$. Многие тела диатермичны для определенной длины волны: кварцевое стекло для ультрафиолета и световых волн, но не прозрачно для инфракрасных; оконное стекло пропускает световые лучи, но малопрозрачно для ультрафиолета и инфракрасных лучей.

Для тепловых лучей твердые тела и жидкости непрозрачны, поглощение лучистой энергии заканчивается на глубине менее 0,01 мм. Если тело поглощает лучи любых длин волн при любых температурах, оно называется **серым**, в противном случае - **цветным**. Реальные тела приближенно считают серыми. У металлов коэффициент поглощения с ростом температур растет, у неметаллов - снижается. Для тепловых лучей главное значение имеет состояние поверхности - белая поверхность хорошо отражает лишь световые лучи, но при одинаковом состоянии поверхности также хорошо поглощает тепловые лучи, как и темная. Поверхность называется зеркальной, если она отражает падающий луч под определенным углом, и матовой - если лучи отражаются по всем направлениям.

2. Законы Кирхгофа, Вина, Больцмана

Связь между излучающей и поглощающей способностями тела устанавливается законом Кирхгофа: наибольшее количество энергии излучается абсолютно черным телом, количество энергии, излучаемое единицей поверхности любого другого тела, пропорционально коэффициенту его поглощения.

Для вывода уравнения Кирхгофа берут две параллельных поверхности: одна серая, другая - абсолютно черная. Серая, соответственно с температурой T , поверхностной плотностью излучения E и коэффициентом поглощения A , а абсолютно черная - T_0 , E_0 , $A_0 = 1$. При $T = T_0$ поток и расход лучистой энергии должны быть одинаковы, т.е. $E = AE_0$, то $E/E_0 = A = a$ - **степень черноты (закон Кирхгофа.)**

Степень черноты тела равна коэффициенту его поглощения. Для абсолютно черного $a=1$, для абсолютно белого $a=0$, для серого $0 < a < 1$. Зависимость интенсивности излучения черного тела от длины волны устанавливается

законом Планка. $I_{0\lambda} = C_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$ Вт/м³ [5.1]

$C_1=3,7 \cdot 10^{-16}$ Вт/м²; $C_2=0,0144$ м.К.

Вычисления по уравнению [5.1] подтверждаются экспериментально : с ростом длины волны интенсивность излучения возрастает от 0 до максимума, а затем снова падает до нуля при $\lambda = \lambda_0$. Длина волны, на которую приходится максимальная интенсивность излучения определяется по формуле $\lambda_0 = (2898/T)10^{-6}$ [5.2] - **закон смещения Вина**, полное количество энергии , излучаемой абсолютно черным

телом $E_0 = \sigma_0 T^4$ [5.3], $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К)- константа излучения абсолютно черного тела. [5.4] - закон Стефана Больцмана.

3. Схема передачи тепла излучением

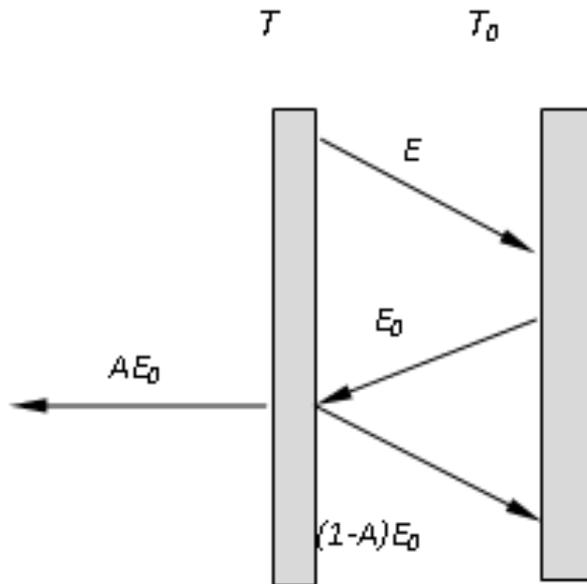


Рис.5.1. Схема передачи тепла излучением

Для практических расчетов уравнение [5.3] удобнее использовать в виде

$E_0 = c_0 (T/100)^4$ $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела. Для газов в расчетах принимают $E_g = a_g c_0 (T/100)^4$, где a_g - степень черноты, или относительная излучающая способность газов.

Теплообмен между телами в общем виде

рассматривается для случаев: 1- тела имеют форму пластин; 2- расположение поверхностей тел концентрическое. При решении задачи передачи лучистой энергии от первого ко второму телу по закону Стефана-Больцмана получим:

поверхностей тел S_1, S_2 . отношение $H_{л} / S_1 = \psi_{1-2}$ называется угловым коэффициентом, или коэффициентом облученности второго тела от первого. Величины $H_{л}, \psi_{1-2}$ рассчитывают заранее и приводят в таблицах.

Для расчета лучистого теплообмена между газом (первое тело) и стенкой (второе тело) **применяют формулу Михеева**

$$q_{1-2} = a'_{cm} a'_2 c_0 [(T_1 / 100)^4 - (T_2 / 100)^4] \quad [5.9],$$

Где при

$$a_{cm} = 0,8 \div 1,0 \quad a'_{cm} = 0,5 (a_{cm} + 1). \quad a'_2 = \frac{a_2 - A_2 (T_{cm} / T_2)}{1 - (T_{cm} / T_u)} \quad [5.10]$$

При сложном теплообмене, когда наблюдаются случаи конвективного теплообмена и лучеиспускания (топочные устройства, стекловаренные печи, камеры обжига керамики при использовании горящих газов) общее количество переданной теплоты

$$q_{1-2} = q_k + q_l = \alpha_k (T - T_{cm}) + c_{1-2} [(T_1 / 100)^4 - (T_2 / 100)^4] \quad [5.11],$$

где α_k - коэффициент теплоотдачи конвекцией; T - температура жидкости или газа; T_{cm} - температура тепловоспринимающей стенки; c_{1-2} - приведенный коэффициент излучения. Для удобства расчетов применяют формулу $q_{1-2} = \alpha_k (T - T_{cm}) + \alpha_l (T - T_{cm})$ [5.12], где

$$\alpha_l = \frac{c_{1-2} [(T / 100)^4 - (T_{cm} / 100)^4]}{T - T_{cm}} \quad [5.13]$$

сумма $\alpha_k + \alpha_l = \alpha$ называется эффективным коэффициентом теплоотдачи, который в очень сильной степени зависит от температуры. Например, для случая теплообмена с воздухом при естественной конвекции $t_{ст} = 0$; $c_{1-2} = 4,7$ Вт/(м².К); $Cr \cdot Pr = 108 \div 1012$. При $t = 150^\circ\text{C}$, $\alpha_k = \alpha_l = 8,3$ Вт/(м².К). При $t = 500^\circ\text{C}$, $\alpha_k < \alpha_l$ в 4 раза. При $t = 1000^\circ\text{C}$, $\alpha_k < \alpha_l$ в 20 раз.

Потери тепла через многослойную стенку в окружающую среду определяют по зонам, на которые разделено рабочее пространство теплового агрегата.

Для теплового оборудования непрерывного действия, работающих постоянными температурами в отдельно взятой зоне, тепловой поток через поверхность стенки F (м₂) в окружающую среду определяется по формуле

$$Q = \frac{3,6 \cdot (t_{т.н} - t_{воз}) \cdot F}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ кДж/ч} \quad [5.14],$$

или по формуле

$$Q = \frac{0,001(t_{газ} - t_{воз}) \cdot F}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ кВт} \quad [5.15],$$

где $(t_{т.н} - t_{воз})$ — разность температур

теплоносителя и окружающего воздуха, град;

α_1 — коэффициент теплоотдачи от греющей среды к стенкам внутри рабочего пространства:

при невысокой температуре (сухих газов) $\alpha_1 = 7—14$ Вт/(м²·К);

для смеси воздуха с водяным паром $\alpha_1 = 20—200$ Вт/(м²·К);

Тема 4. Акустические свойства материалов

Вопросы:

1. Введение. Звукоизоляция и звукопоглощение. Необходимость акустической обработки жилых помещений.
2. Классификация звукопоглощающих и звукоизоляционных строительных материалов.
3. Структура акустических материалов.

1 Введение. Звукоизоляция и звукопоглощение. Необходимость акустической обработки жилых помещений.

Акустическая обработка помещений промышленных, жилых и общественных зданий проводится для защиты человека от шума.

Повышенный шум в помещениях относится к категории санитарно-гигиенических вредностей: если шум превышает **нормативные требования (52 дБ) на 15 – 20 дБ, то производительность труда снижается на 10 – 20 %**. Уменьшение шума в результате использования акустических материалов сохраняет здоровье человека, создает для него необходимые удобства и способствует повышению производительности труда. Выбор акустического материала зависит от вида шума, его уровня и частотной характеристики [195, 276].

Для увеличения звукоизоляции рекомендуется совместное использование звукопоглощающих и звукоизолирующих материалов, увеличение массивности ограждающих конструкций и их акустическая развязка в местах примыканий.

Акустические материалы подразделяются на звукопоглощающие и звукоизоляционные прокладочные материалы. **Звукопоглощение** – это снижение энергии отраженной звуковой волны при взаимодействии с преградой.

Звукоизоляция – снижение уровня звукового давления при прохождении волны сквозь преграду.

Звукопоглощение и звукоизоляция — неразрывно связаны с уменьшением передачи звука в конструкциях.

Если источник звука и приемник находятся в одном помещении, ослабление звука происходит за счет поглощения его ограждающими конструкциями помещения или специальными устройствами стен и потолка материалами с высокой структурной пористостью. Потери энергии звуковых волн, падающих на ограждения, в этом случае, обусловлены переходом энергии звука в другие виды энергии, **главным образом в тепло** (звукопоглощение).

Если же источник и приемник находятся в разных помещениях и их разделяют стены, перегородки или другие строительные элементы, ослабление звука достигается за счет свойства указанных ограждений препятствовать прохождению звука сквозь эти преграды (звукоизоляция).

Звукопоглощающие материалы применяются в основном в облицовках промышленных зданий и технического оборудования, требующих снижения уровня шума, а также для создания оптимальных условий слышимости и улучшения акустических свойств помещений общественных зданий. По мере улучшения качества жилья проблема звукоизоляции становится наиболее актуальной. Число бытовой техники в квартирах неуклонно растет. Звуковая аппаратура становится все более мощной, что существенно повышает шумовой уровень в помещении. Кроме того, низкое качество строительства реально не всегда обеспечивает нормативные показатели шумовой нагрузки.

Классификация звукопоглощающих и звукоизоляционных строительных материалов.

Звукопоглощающие и звукоизоляционные строительные материалы подразделяются по следующим основным признакам [274]: назначению, форме, жесткости (величине относительного сжатия), возгораемости (горючести), структуре.

По форме данные изделия делятся на: штучные, рулонные (маты, полосовые прокладки, холсты), рыхлые и сыпучие (вата минеральная и стеклянная, керамзит и другие пористые заполнители).

По величине относительного сжатия звукоизоляционные и звукопоглощающие строительные материалы и изделия делятся на мягкие, полужесткие, жесткие и твердые.

Звукопоглощающие материалы имеют волокнистое, зернистое или пористое строение и применяются с целью снижения уровня звукового давления в помещениях производственных и общественных зданий. **В звукопоглощающем материале твердое вещество занимает только часть общего объема** - открытая пористость такого материала составляет от 60% до 95 %.

Коэффициент извилистости пор $\beta = l_{\text{пор}} / l_m$ в них имеет значение от 2 до 4,8 ; где $l_{\text{пор}}$ – средняя длина пор, 10^{-4} м ; l_m = толщина материала (полотна, холста), 10^{-4} м . Колебания воздуха, вызываемые действие звукового давления на поверхность материала, распространяются в этих порах с затуханием из-за аэродинамического сопротивления за счет трения о поверхность пор. Максимальный эффект по коэффициенту звукопоглощения достигается при среднем диаметре открытых пор от $3 \cdot 10^{-6}$ м до $5 \cdot 10^{-6}$ м. ; $\alpha = 0,92$

Звукоизоляционные материалы изготавливаются в виде рулонов или плит в конструкциях межэтажных перекрытий, во внутренних стенах и перегородках, а также как виброизоляционные прокладки под машины и оборудование и применяются с целью улучшения изоляции звука [271 – 273].

По структурным признакам данные виды изделий разделяются на пористо-волокнистые (из минеральной и стеклянной ваты), пористо-ячеистые (из ячеистого бетона и перлита), пористо-губчатые (пенопласты, резины).

Звукоизоляционным называется материал, характеризующийся вязкоупругими свойствами и обладающий динамическим модулем упругости не более 15 МПа [274].

одним из самых перспективных звукопоглощающих материалов является термосшитый нетканый материал, получаемый на основе наномодифицированного пожаробезопасного полиэтилентерефталатного волокна с регулируемым размером пор.

В настоящее время в промышленных масштабах выпускаются **звукопоглощающие полимерные плиты АкустовЪ™-Люкс-50 (АкустовЪ™-СК-Люкс)** предназначенные для использования в качестве внутреннего звукопоглощающего слоя при устройстве каркасных настенных и потолочных звукоизолирующих конструкций с глухой акустически непрозрачной, внешней облицовкой (для повышения индекса звукоизоляции существующих ограждающих конструкций), а также при создании вновь возводимых стен и перегородок - для повышения их акустических характеристик.

Возможно применение плиты **АкустовЪТМ-Люкс-50** в качестве звукопоглощающего слоя при устройстве звукопоглощающих конструкций с перфорированной, акустически прозрачной внешней облицовкой (из панелей АкустовЪТМ- Декор).

Плита АкустовЪТМ-Люкс-50 изготавливается из сверхтонкого полиэфирного волокна методом псевдообъёмного переплетения волокон.

Максимальный эффект от применения плиты АкустовЪТМ-Люкс-50 достигается при использовании её в качестве звукопоглощающего среднего слоя при устройстве звукоизолирующих каркасных перегородок и подвесных потолков на основе с внешней облицовкой из нескольких слоёв ГКЛ/ГВЛ.

Отличительные особенности

Высокие звукопоглощающие характеристики на средних и высоких частотах

Нетоксичный, гипоаллергенный материал

Основные характеристики

Длина плиты - 1200 мм

Ширина плиты - 600 мм

Толщина плиты: АкустовЪ™- СК-Люкс50 - 50 мм

АкустовЪ™- СК-Люкс100 - 100 мм

Средний коэффициент звукопоглощения NRC = 0,9

Особенности применения

В конструкциях акустических подвесных потолков плиты АкустовЪ™-Люкс-50 монтируются в пространство между подвесным потолком и плитой перекрытия. В конструкциях звукопоглощающих облицовок и звукоизолирующих каркасных перегородок звукопоглощающие плиты закладываются в ячейки обрешётки.

Звукопоглощающие материалы испытывают согласно ГОСТ 16297-80 [353]. по определению нормального коэффициента звукопоглощения.

Два принципиально разных процесса: звукопоглощение и звукоизоляция — неразрывно связаны с уменьшением передачи звука в конструкциях. Если источник звука и приемник находятся в одном помещении, ослабление звука происходит за счет поглощения его ограждающими конструкциями помещения или специальными устройствами стен и потолка материалами с высокой структурной пористостью. Потери энергии звуковых волн, падающих на ограждения, в этом случае, обусловлены переходом энергии звука в другие виды энергии, главным образом в тепло (звукопоглощение).

Если же источник и приемник находятся в разных помещениях и их разделяют стены, перегородки или другие строительные элементы, ослабление звука достигается за счет свойства указанных ограждений препятствовать прохождению звука сквозь эти преграды (звукоизоляция). Очень часто оба указанных процесса протекают одновременно: падающие на ограждающую конструкцию звуковые волны частично отражаются, возвращаясь к источнику звука, частично поглощаются, превращаясь в тепло, частично проходят сквозь преграду. Все материалы, призванные защитить от шума в зданиях, обладают общими классификационными признаками и различаются по структуре, упругоэластическим свойствам, горючести и форме. Одним из специфических, но принципиально значимых признаков таких материалов считается

их назначение, в соответствии с которым их подразделяют на звукопоглощающие и звукоизоляционные.

Звукопоглощающим называют такой материал, в котором твердое вещество занимает только часть общего объема. При этом частицы твердого вещества относительно равномерно распределены по всему объему, образуя многочисленные микроскопические полости, сообщающиеся между собой. Колебания воздуха, вызываемые действием звукового давления на поверхность материала, распространяются в этих полостях с затуханием, которое обусловлено вязкостью воздуха в парах и трением с поверхностью стенок пор. По структурным признакам звукопоглощающие материалы подразделяют на волокнистые и пористые.

Волокнистый материал представляет собой набор параллельных слоев с хаотическим переплетением волокон, получаемых фильерно-дутьевым способом из расплавленных пород, таких как кварц, базальт, доломит, а также из расплавленного стекла. Из волокнистого ковра производят изделия: маты, рулоны, холсты различной толщины либо жесткие и полужесткие плиты, изготавливаемые из той же волокнистой массы с добавлением небольшого количества связующего и последующим прессованием.

В пористом материале вещество распределяется в виде сплошных зерен или гранул, образуя зернистую или ячеистую структуру. Жесткие пористые материалы, в структуре которых преобладает межзерновая пористость,

оптимальных акустических условий за счет увеличения в них фонда звукопоглощения. При этом под фондом звукопоглощения понимают произведение основного показателя эффективности звукопоглощающего материала на площадь поверхностей ограждающих конструкций, на которых он размещен.

Показатель акустической эффективности звукопоглощающих материалов — коэффициент звукопоглощения (КЗП)-служащий мерой для оценки поглощающих свойств материалов, определяется отношением неотраженной части энергии звука к общему количеству энергии звука, падающего на данную поверхность. При полном отражении звука ограждениями КЗП равен нулю, а при полном

производят из гипсового камня, шлака, перлита. Эластичные пенопласты изготавливаемые из сложных полиэфиров, имеют ячеистую структуру, в которой стенки пор являются гибкими полимерными пленками. К таким материалам относятся **пенополиэтилены, каучуки и пенополипропилены**. Колебания таких пленок вызывают дополнительные потери звуковой энергии в среде. Общим признаком для тех и других звукопоглощающих материалов является наличие в них сквозных (сообщающихся) пор, через которые относительно свободно проходит поток воздуха.

Основное назначение звукопоглощающих материалов – обеспечить в помещениях общественных и промышленных зданий (зрительных залах, аудиториях, спортивных и конференц-залах, офисах учреждений, вокзалах, аэропортах и других местах пребывания большого количества людей)

поглощении- единице. КЗП материала зависит от частоты падающего звука, толщины слоя материала и угла падения звуковых волн на поверхность материала.

Различают нормальный КЗП (при нормальном падении звуковых волн на поверхность материала) и реверберационный КПЗ определяемый при падении звуковых волн на материал со всех сторон и под всевозможными углами. **Реверберационный КЗП обычно используют в практических расчетах.** Оба этих коэффициентов являются частотно -зависимыми, т.е. в разных областях звукового диапазона частот они принимают различные значения величин.

Эффективность поглощения звука материалами обусловлена наличием в них большого количества мелких открытых сквозных пор с большой удельной поверхностью.

Применяя различные виды сырья и технологические режимы производства, создают материалы с определенными структурными характеристиками – минимальной плотностью, высокой пористостью, максимальной удельной поверхностью пор, а следовательно, с наиболее высокими показателями звукопоглощающих свойств.

Мягкие звукопоглощающие материалы изготавливают на основе минеральной ваты или стекловолокна с минимальным объемом связующего или без него. К ним относятся маты или рулонные полотна, которые обычно применяются в сочетании с защитными перфорированными листовыми экранами (из алюминия, гипсокартона, покрытием из тонкой пористой пленки). КЗП этих материалов на средних частотах достигает значений 0,7-0,85.

К полужестким материалам относят минераловатные и стекловолокнистые плиты толщиной от 12 до 50 мм, плотностью 40-130 кг/м. куб. при содержании связующего до 15% по массе. Поверхность плит покрывают пористой краской, стеклохолстом или пленкой. КЗП этих материалов на средних частотах – 0,75-1,0. Полужесткими звукопоглощающими материалами считают также базальтовые звукопоглощающие маты, получаемые из очень тонкого базальтового волокна с покрытием из стеклоткани. Их плотность не превышает 25кг/м.куб., а КЗП на средних частотах – более 0,9.

В отличие от звукопоглощающих материалов основными показателями акустической эффективности звукоизоляционных (прокладочных) материалов считают динамический модуль упругости E ,

коэффициент относительного сжатия и коэффициент потерь энергии колебаний на внутреннее трение в материале при его деформации. Поскольку все материалы в большинстве случаев предназначены для изоляции волн, возникающих при ударах и механических колебаниях конструкций (ударный и структурный шум) и распространяющихся на значительные расстояния по строительным конструкциям, **наличие или отсутствие сквозной пористости в структуре такого материала не играет решающей роли при оценке его акустической эффективности.**

К звукоизоляционным материалам относят прежде всего, те же волокнистые плиты и маты на синтетическом связующем из минерального или стеклянного волокна, а также пористые, мягкие резины, современные эластичные пластмассы из вспененного полиэтилена, каучука и полипропилена.

Эффективность упругой прокладки определяется, в основном, модулем упругости материала, из которого она изготовлена, а также ее толщиной и плотностью. Поскольку большинство звукоизоляционных прокладочных материалов не являются идеально упругими телами, то при периодическом воздействии на прокладку внешней силы ее деформация не успевает развиться за период воздействия силы и модуль упругости E становится комплексной величиной. Действительную часть модуля, характеризующую энергию, получаемую и отдаваемую единицей объема тела за период и называют динамическим модулем упругости. Мнимую же часть модуля упругости E , называют модулем потерь энергии. Она характеризует ту часть энергии, которая необратимо рассеивается за период деформации.

Эффективность звукоизоляции упругого прокладочного слоя зависит не только от величины модуля упругости E , но и от толщины наружного слоя в обжатом состоянии. Поэтому при выборе звукоизоляционного материала важно обращать внимание и на значения величин коэффициентов относительного сжатия материала как звукоизоляционного слоя под нагрузкой. Поскольку при расчетах ожидаемого улучшения изоляции ударного шума применяют значения толщины звукоизоляционного слоя в обжатом состоянии.

В зависимости от структуры, способа изготовления и вида исходного сырья значения динамического модуля упругости E звукоизоляционных материалов должны находиться в пределах $10^5 \dots 10^8$ Па при нагрузке

на звукоизоляционный слой 2000 Па, коэффициент потерь должен иметь значения не менее 0,05.

Чаще всего наиболее эффективно упругие слои звукоизоляционных материалов используют при устройстве так называемого плавающего пола (стяжки) для улучшения изоляции ударного шума перекрытием и отчасти, для улучшения изоляции воздушного шума. С этой целью стяжки из бетона, гипса, асфальта и других подобных материалов делают толщиной 30-50 мм, при толщине упругого слоя 6 — 15 мм. Обычно в качестве упругого слоя применяют наиболее распространенные и относительно недорогие вспененные полимеры. Эти материалы более эффективны, чем минераловатные прокладки и дешевле,

чем натуральные материалы, такие как пробка, поскольку обладают рядом удивительно высоких теплофизических и звукоизолирующих свойств. На строительных площадках их используют не только в качестве звукоизоляционных прокладок в конструкциях плавающего пола, но и для облицовки многочисленных трубопроводов, воздухопроводов и каналов, по которым возможны распространение и передача шума от его источника к защищаемому помещению. Особая роль отводится таким материалам для предотвращения распространения так называемого структурного звука, в значительной мере снижающего эффективность звукоизоляции в зданиях современной постройки из монолитного бетона.

Перечень литературы , использованной при подготовке курса

- 1. [Кудинов В. А, Карташов Э.М., Стефанюк В.Е.](#) Техническая термодинамика и теплопередача, учебник, Серия: [Бакалавр](#), изд: Юрайт-Издат, ООО, 2011., 560 с ISBN: 9785991620666
- 2. Ерохин В.Г. , Маханько М.Г. Основы термодинамики и теплотехники.- : [Либроком](#), 2009.,224 с. ISBN: 978-5-397-00381-0
- 3. Христофоров А.И. Техническая термодинамика и теплотехника: практ. пособие. В 2 ч. Ч. Теплопередача / А.И. Христофоров; Владим. го. унт. – Владимир: изд-во Владим. гос. ун-та, 2011. – 74 с. – ISBN 978 - 5- 9984-0097-1
- 4. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. Учебн. для вузов по спец. Пр-во стпроительных изделий и конструкций".-М.: Высш. шк., 1989. – 384с.:ил. ISBN 5-06-000155-5

5. Бахшиева Л.Т., Кондауров Б.П., Захарова А.А., Салтыкова В.С. Техническая термодинамика и теплотехника.- : Академия, 2008., 272 с. ISBN: 978-5-7695-4999-1: учебник для для хим.-техн. спец. вузов. - М.: Высш. школа, 1986.-344 с.
6. ЗАО "Акустические Материалы и Технологии" www.acoustic.ru/about/ 2013 г.
7. [Теплоизоляционные и акустические материалы и изделия](http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-76/133.htm) www.bibliotekar.ru/spravochnik-76/133.htm 2013 г.
8. [Акустические материалы](http://chel.pulscen.ru/firms/100612-akusticheskie-materialy), chel.pulscen.ru/firms/100612-akusticheskie-materialy nn.all-gorod.ru/infopage/akusticheskie_materialy, 2013г.
9. [Акустические материалы для коррекции акустики помещений ...](http://www.airfon-media.ru/acoustical-materials/) www.airfon-media.ru/acoustical-materials/ 2013 г.
10. [Звукоизоляционные и акустические материалы](http://fis.ru/Zvukoizolyaciya). fis.ru/Zvukoizolyaciya. Каталог компаний товаров и услуг в рубрике Акустические материалы - прайс-листы 2013 г.