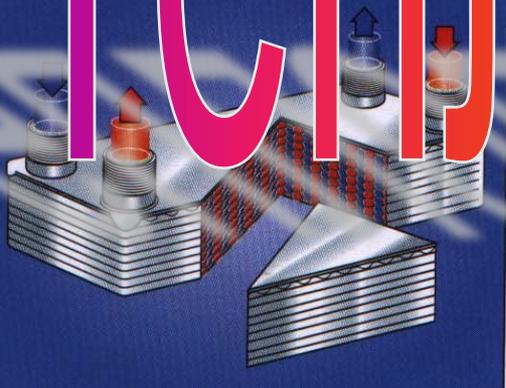


Теплопередача



- *Теплопередача* или *теплообмен* — учение о самопроизвольных необратимых процессах распространения теплоты в пространстве.
- *Тепловым потоком* называется поток внутренней энергии, самопроизвольно возникающий в вещественной среде с неоднородным температурным полем. В простейшем случае, когда нет физико-химических превращений, взаимной диффузии разнородных веществ, больших скоростей течения и т. п., тепловой поток направлен из области с более высокой температурой в область с низкой температурой.

Различают три процесса переноса теплоты:

Тепловое излучение — процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела; при этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения. Процесс превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса излучения и его поглощения веществом называется теплообменом излучением.

Сложным теплообменом называются процессы переноса теплоты одновременно несколькими способами—теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

- Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называется *конвективным теплообменом*.
- Процессы конвективного теплообмена всегда связаны с теплопроводностью внутри перемещающихся значительных (молярных) элементов потока вещества.
- Теплообмен, обусловленный совместным переносом теплоты излучением и теплопроводностью, называют *радиационно-кондуктивным теплообменом*.
- Если перенос теплоты осуществляется дополнительно и конвекцией, то такой процесс называют *радиационно-конвективным теплообменом*.

- *Теплоотдачей* называется процесс теплообмена (теплопереноса) между средами, разделенными отчетливой границей (твердая стенка—текучая среда, поверхность раздела газ — жидкость или двух несмешивающихся жидкостей)
- *Теплопередачей* называется процесс теплообмена между средами, разделенными некоторой перегородкой.

- Часто процессы переноса теплоты сопровождаются переносом вещества. Совместный молекулярный и конвективный перенос массы называют *конвективным массообменом*. При наличии массообмена процесс теплообмена усложняется. Теплота дополнительно может переноситься вместе с массой диффундирующих веществ.
- При теоретическом исследовании теплообмена считается, что рассматриваемые газы, жидкости и твердые тела считаются сплошной средой, т. е. средой, при рассмотрении которой допустимо пренебречь ее дискретным строением.
- Различают однородные и неоднородные сплошные среды. В однородных средах физические свойства в различных точках одинаковы при *одинаковых* температуре и давлении, в *неоднородных* средах различны.
- Различают изотропные и анизотропные сплошные среды. В любой точке *изотропной* среды ее физические свойства не зависят от выбранного направления, и наоборот, в анизотропной среде некоторые свойства в данной точке могут быть функцией направления.
- Сплошная среда может быть однофазной и многофазной. В *однофазной* среде, состоящей из чистого вещества или из смеси веществ, свойства изменяются в пространстве непрерывно. В *многофазной* среде, состоящей из ряда однофазных частей, на границах раздела свойства изменяются скачками.

Дифференциальное уравнение теплопроводности

Граничные условия

$dQ_x = q_x \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau$ – подводенно е тепло

$dQ_{x+dx} = q_{x+dx} \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau$ – отведенное тепло

Разность между ними

$dQ_x = q_x \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau - q_{x+dx} \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau$

Разложив полученную функцию в ряд Тейлора получим dQ_y

$dQ_{x1} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau$

Аналогично можно найти все остальные подводенны е теплоты

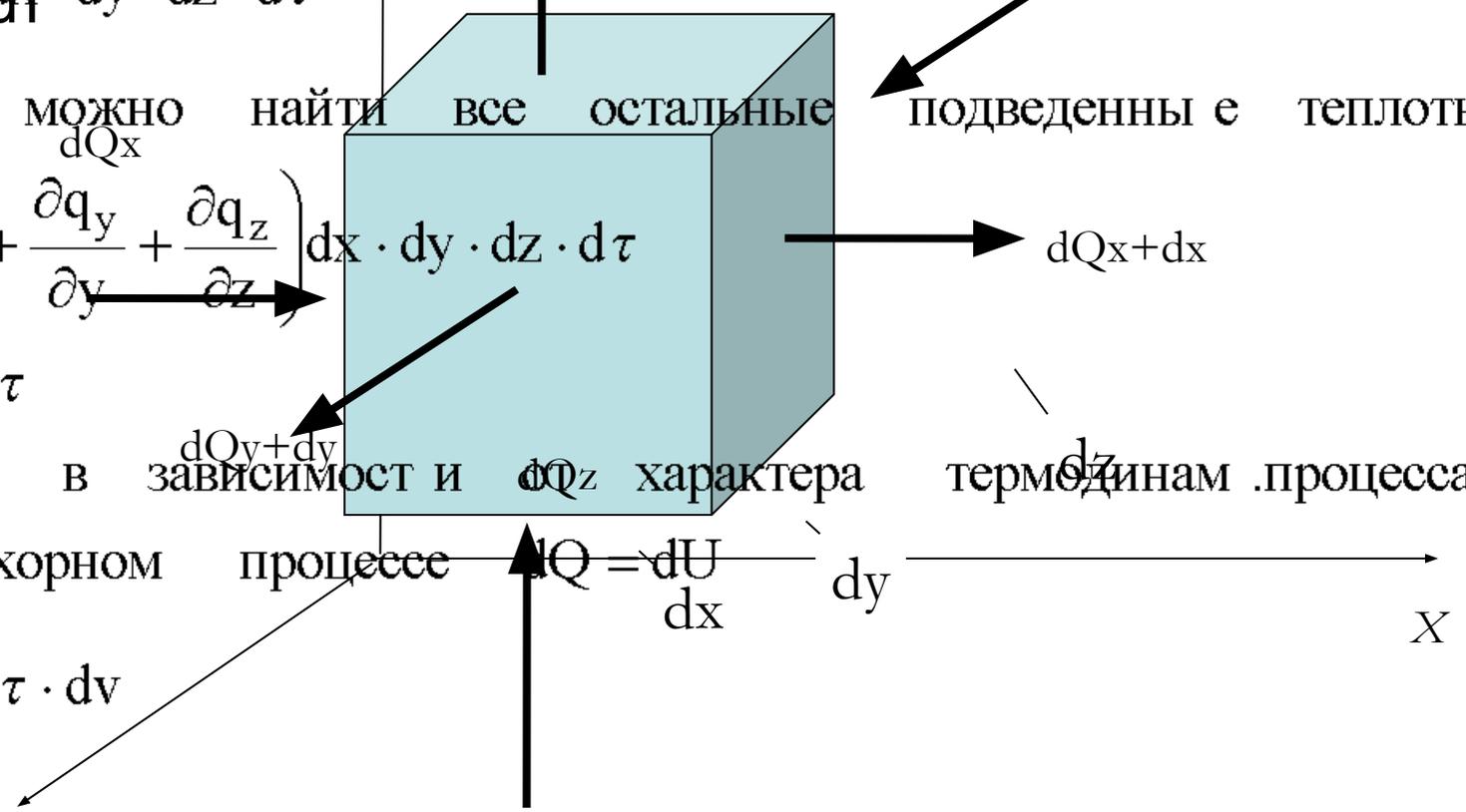
$dQ_1 = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau$

$dQ_2 = q_v dv \cdot d\tau$

dQ – находим в зависимости и характера термодинам. процесса

Так при изохорном процессе $dQ = dU$

$dU = c_v \rho \frac{dt}{d\tau} d\tau \cdot dv$



Подставив все полученные выражения,
получим дифференциальное уравнение
энергии для изохорного процесса переноса
теплоты

$$c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + q_v$$

Получим дифференциальное уравнение энергии для
изобарного процесса переноса теплоты

$$dQ_1 + dQ_2 = dH$$
$$dH = \rho \frac{\partial h}{\partial \tau} d\tau \cdot dv$$
$$\rho \frac{\partial h}{\partial \tau} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + q_v$$

В твердых телах перенос теплоты осуществляется по закону Фурье

$$q_x = -\lambda \cdot \partial t / \partial x$$

$$q_y = -\lambda \cdot \partial t / \partial y$$

$$q_z = -\lambda \cdot \partial t / \partial z$$

Разность между $c_v - c_p = c$ мала

примем c без индекса

Дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right) + \frac{q_v}{c \cdot \rho}$$

Если принять теплофизические характеристики постоянными, то уравнение примет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c \cdot \rho}$$

$$\frac{\lambda}{c \rho} = a; \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \nabla^2$$

Получим
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c \cdot \rho}$$

- Коэффициент пропорциональности a , $\text{м}^2/\text{с}$, называется *коэффициентом температуропроводности* и является физическим параметром вещества.
- Он существен для нестационарных тепловых процессов и характеризует скорость изменения температуры.
- Коэффициент температуропроводности является мерой теплоинерционных свойств тела.
- Изменение температуры во времени dt/dt для любой точки пространства пропорционально величине a . Скорость изменения температуры в любой точке тела будет тем больше, чем больше коэффициент температуропроводности a .
- При прочих равных условиях выравнивание температур во всех точках пространства будет происходить быстрее в том теле, которое обладает большим коэффициентом температуропроводности.
- Коэффициент a зависит от природы вещества. Жидкости и газы обладают малым коэффициентом температуропроводности. Металлы обладают малой тепловой инерционностью и имеют большой коэффициент температуропроводности.

При стационарной теплопроводности и
отсутствии внутренних источников теплоты
диф.уравнение принимает вид уравнения
Лапласа

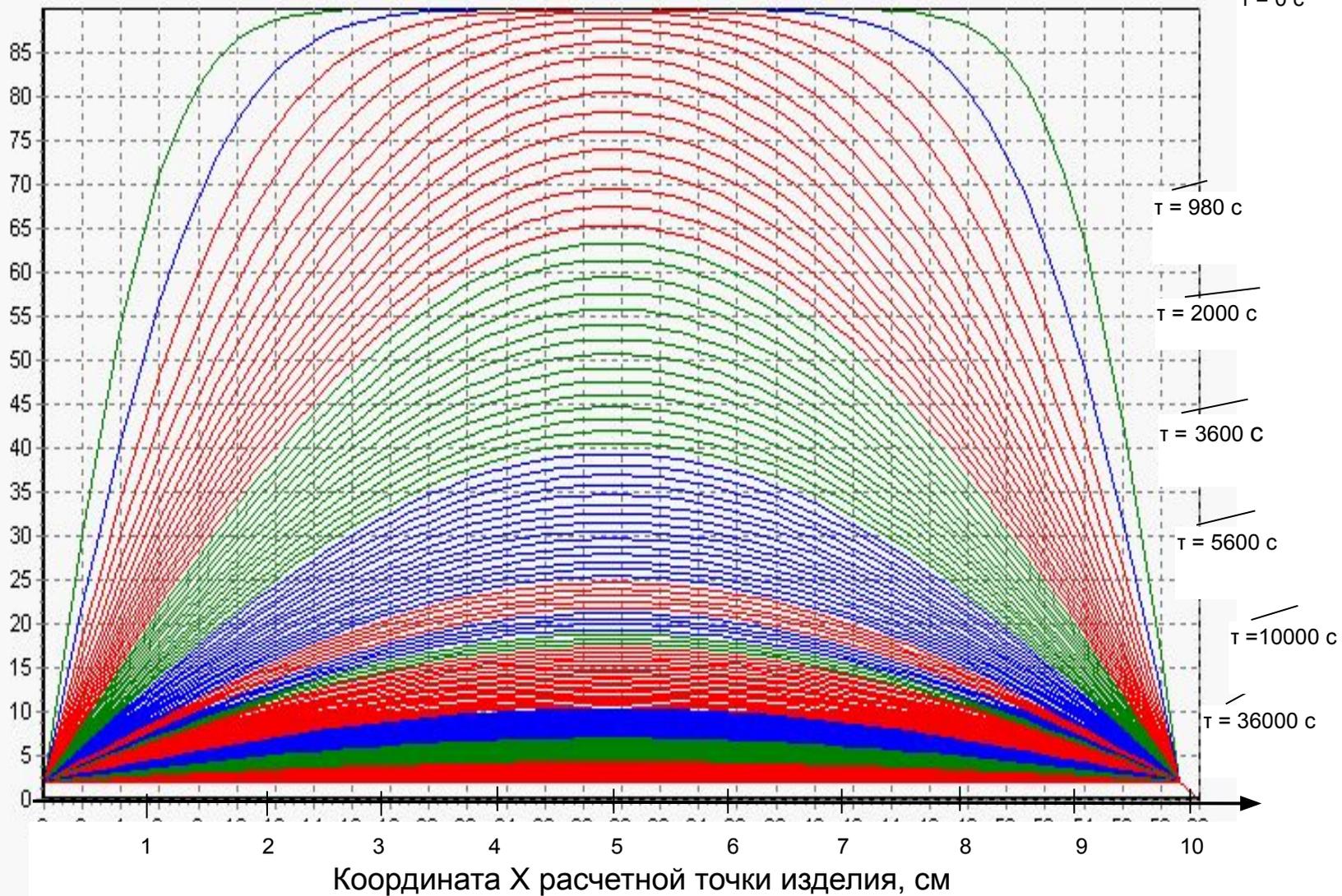
$$\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = 0$$

~~Если система тел имеет внутренние источники теплоты, но температурное поле соответствует стационарному состоянию, т. е. $t = t(x, y, z)$, то диф.уравнение теплопроводности превращается в уравнение Пуассона~~

$$\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\lambda} = 0$$

Конвективное охлаждение

Тем-
пера-
тура,
°C



$\tau = 0 \text{ c}$

$\tau = 980 \text{ c}$

$\tau = 2000 \text{ c}$

$\tau = 3600 \text{ c}$

$\tau = 5600 \text{ c}$

$\tau = 10000 \text{ c}$

$\tau = 36000 \text{ c}$

Координата X расчетной точки изделия, см

УСЛОВИЯ ОДНОЗНАЧНОСТИ

- Чтобы выделить конкретно рассматриваемый процесс и дать его полное математическое описание, к диф. уравнению необходимо присоединить математическое описание всех частных особенностей рассматриваемого процесса. Эти частные особенности называются условиями однозначности или краевыми условиями.
- Условия однозначности включают в себя:
- геометрические условия, характеризующие форму и размеры тела, в которых протекает процесс; они определяют форму и линейные размеры тела.
- физические условия, характеризующие физические свойства среды и тела; задаются физическими параметрами тела и может быть задан, закон распределения внутренних источников теплоты.
- временные (начальные) условия, характеризующие распределение температур в изучаемом теле в начальный момент времени; необходимы при рассмотрении нестационарных процессов и состоят в задании закона распределения температуры внутри тела в начальный момент времени. Начальное условие аналитически может быть записано при $t = 0$ $t = f(x, y, z)$. При равномерном распределении температуры в теле начальное условие упрощается (при $t = 0$) $t = t_0 = \text{const}$.
- граничные условия, характеризующие взаимодействие рассматриваемого тела с окружающей средой. *Граничные условия могут быть заданы несколькими способами*

Граничные условия

- **Граничные условия первого рода.**

Задается распределение температуры на поверхности тела для каждого момента времени: $t_z = f(x, y, z, t)$,

где t_z — температура на поверхности тела; x, y, z — координаты поверхности тела.

- **Граничные условия второго рода.**

Задаются значения теплового потока для каждой точки поверхности тела и любого момента времени : $q_p = f(x, y, z, t)$

- где — q_p плотность теплового потока на поверхности тела; x, y, z — координаты на поверхности тела.

- **Граничные условия третьего рода.**

- Задаются температура окружающей среды t_c и закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой в процессе охлаждения *или* нагревания тела.

- Для описания процесса теплообмена между поверхностью тела и средой используется закон Ньютона—Рихмана- количество теплоты, отдаваемое единицей поверхности тела в единицу времени, пропорционально разности температур поверхности тела t_z и окружающей среды t_c

- $q = \alpha(t_c - t_z)$

где α — коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом теплоотдачи*, Вт/(м²-К), характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Численно он равен количеству теплоты, отдаваемому (или воспринимаемому) единицей поверхности в единицу времени при разности температур между поверхностью тела и окружающей средой, равной одному градусу.

- Согласно закону сохранения энергии количество теплоты, которое отводится с единицы поверхности в единицу времени вследствие теплоотдачи, должно равняться количеству теплоты, подводимому к единице поверхности в единицу времени вследствие теплопроводности из внутренних объемов тела, т. е.

$$\alpha (t_c - t_{ж}) = - \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_c,$$

$$\left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_c = - \frac{\alpha}{\lambda} (t_c - t_{ж}).$$

где n — нормаль к поверхности тела;

индекс „с" указывает на то, что температура и градиент относятся к поверхности тела (при $n = 0$).

- Дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c \cdot \rho}$$

с заданными условиями однозначности дает полную математическую формулировку краевой задачи теплопроводности. Поставленная таким образом задача разрешается аналитическим, численным или экспериментальным методом.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

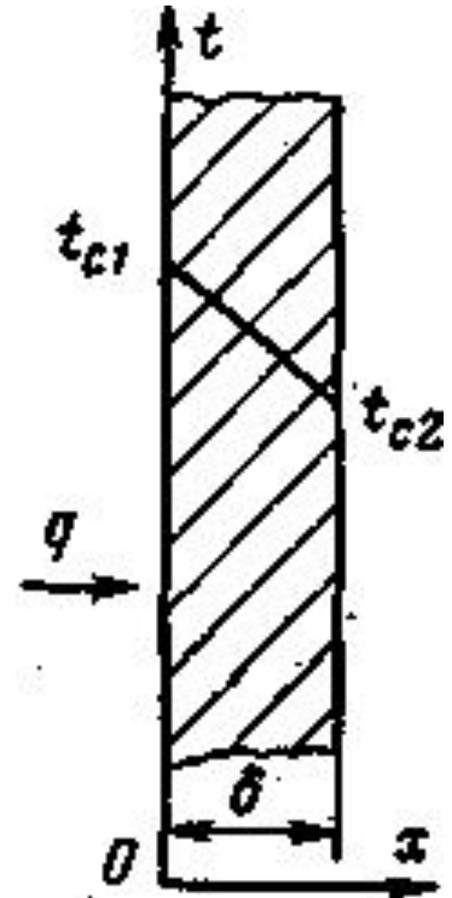
- При стационарном тепловом режиме температура тела во времени остается постоянной, т. е. $dt/d\tau = 0$.

$$a \cdot \nabla^2 \cdot t + \frac{q_v}{c \cdot \rho} = 0 \quad \text{ИЛИ}$$

$$\nabla^2 \cdot t + \frac{q_v}{\lambda} = 0$$

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

- **Граничные условия первого рода.**
Стенка : однородная и изотропная ,
толщина δ с постоянным коэффициентом
теплопроводности λ .
- ~~На наружных поверхностях стенки~~ поддерживают постоянными температуры t_{c1} и t_{c2} .
- *Закон распределения температур по толщине стенки найдется в результате двойного интегрирования уравнения*



$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0$$

- Количество теплоты, проходящее через единицу поверхности стенки в единицу времени, прямо пропорционально коэффициенту теплопроводности λ , разности температур на наружных поверхностях стенки и обратно пропорционально толщине стенки.
- Тепловой поток определяется не абсолютным значением температур, а их разностью которую принято называть **температурным напором**.
- Отношение λ/δ ($\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$), называется **тепловой проводимостью стенки**, а обратная величина δ/λ ($\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$) — **тепловым или термическим**, сопротивлением стенки и представляет собой падение температуры в стенке на единицу плотности теплового потока.

Общее количество теплоты

$$Q_{\tau} = q \cdot F \cdot \tau = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) F \cdot \tau (\text{Дж})$$

Где q – плотность теплового потока, Вт/м²;

F – площадь теплопередающей поверхности, м²;

τ - время воздействия теплового потока, с.

$$\frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} = \frac{q}{\lambda} \text{ подставив в выражение } t = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} \cdot x$$

Получим
$$t = t_{c1} - \frac{q}{\lambda} \cdot x$$

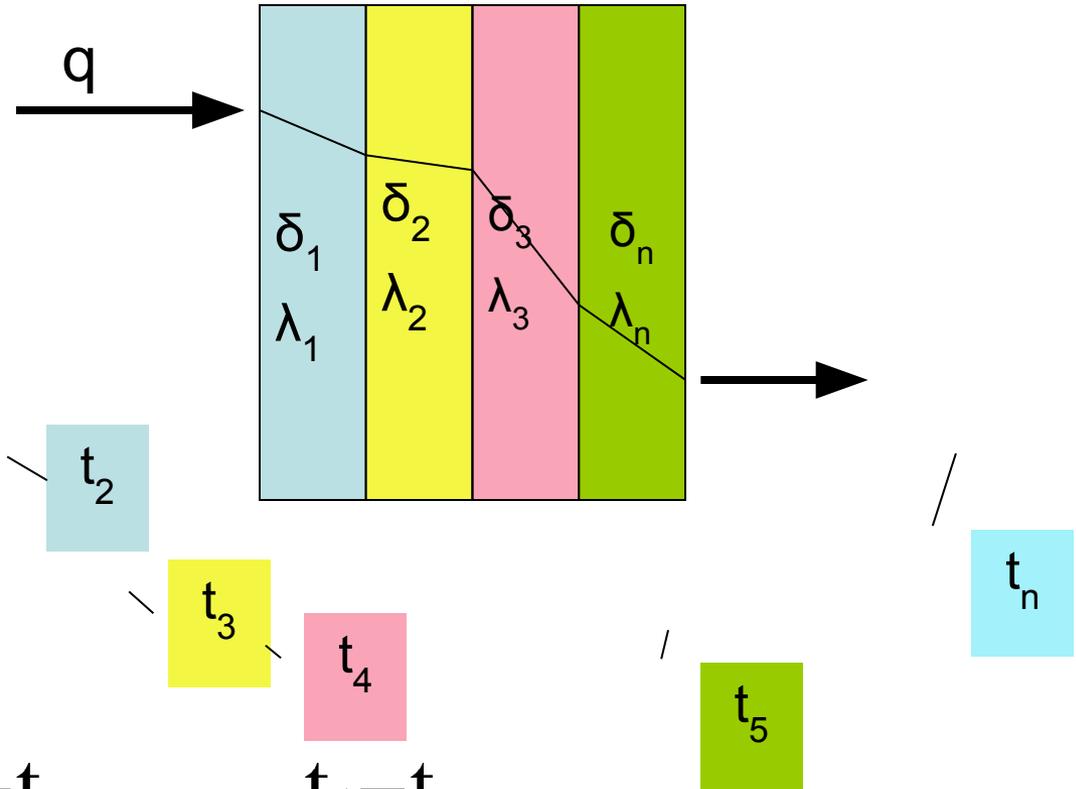
При прочих равных условиях температура в стенке убывает тем быстрее, чем больше плотность теплового потока

- Если коэффициент теплопроводности λ зависит от температуры, то q можно вычислять в предположении, что $\lambda = \text{const}$, принимая для него среднее значение в интервале температур от t_{c1} до t_{c2} .
- Это же определение относится ко всем теплофизическим значениям параметров системы.

Тепловой поток в многослойной стенке

Выводится из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_1 - t_2) \dots \\ q = \frac{\lambda_n}{\delta_n} (t_{n-1} - t_n) \end{array} \right.$$

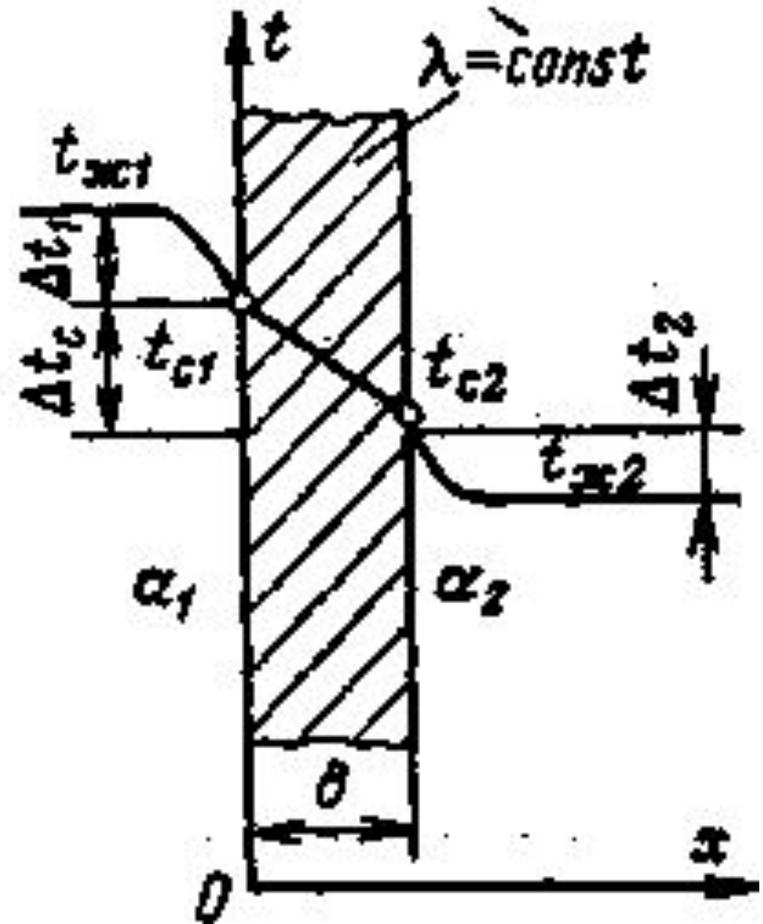


$$q = \frac{t_1 - t_n}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{t_1 - t_n}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$

Внутри каждого из слоев температура изменяется прямолинейно , а для многослойной стенки в целом температурная кривая представляет ломаную линию

Граничные условия 3 рода (теплопередача)

- Передача теплоты из одной среды (жидкости или газа) к другой через разделяющую их однородную или многослойную твердую стенку любой формы называется *теплопередачей*. Теплопередача включает в себя теплоотдачу от более горячей жидкости к стенке, теплопроводность в стенке, теплоотдачу от стенки к более холодной среде.



Выводим уравнение теплопередачи

$$q = \alpha_1 (t_{ж1} - t_{c1})$$

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2})$$

$$q = \alpha_2 (t_{c2} - t_{ж2})$$



$$q \frac{1}{\alpha_1} = (t_{ж1} - t_{c1})$$

$$q \frac{\delta}{\lambda} = (t_{c1} - t_{c2})$$

$$q \frac{1}{\alpha_2} = (t_{c2} - t_{ж2})$$

С
Л
О
Ж
И
Т
Ь

Получим

$$q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = t_{ж1} - t_{ж2}$$



$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}$$

Если

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}$$

$$q = k (t_{ж1} - t_{ж2})$$

- Величина k имеет ту же размерность, что и α , и называется *коэффициентом теплопередачи*.
- Коэффициент теплопередачи k характеризует интенсивность передачи теплоты от одной жидкости к другой через разделяющую их 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 теплопередачи*

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

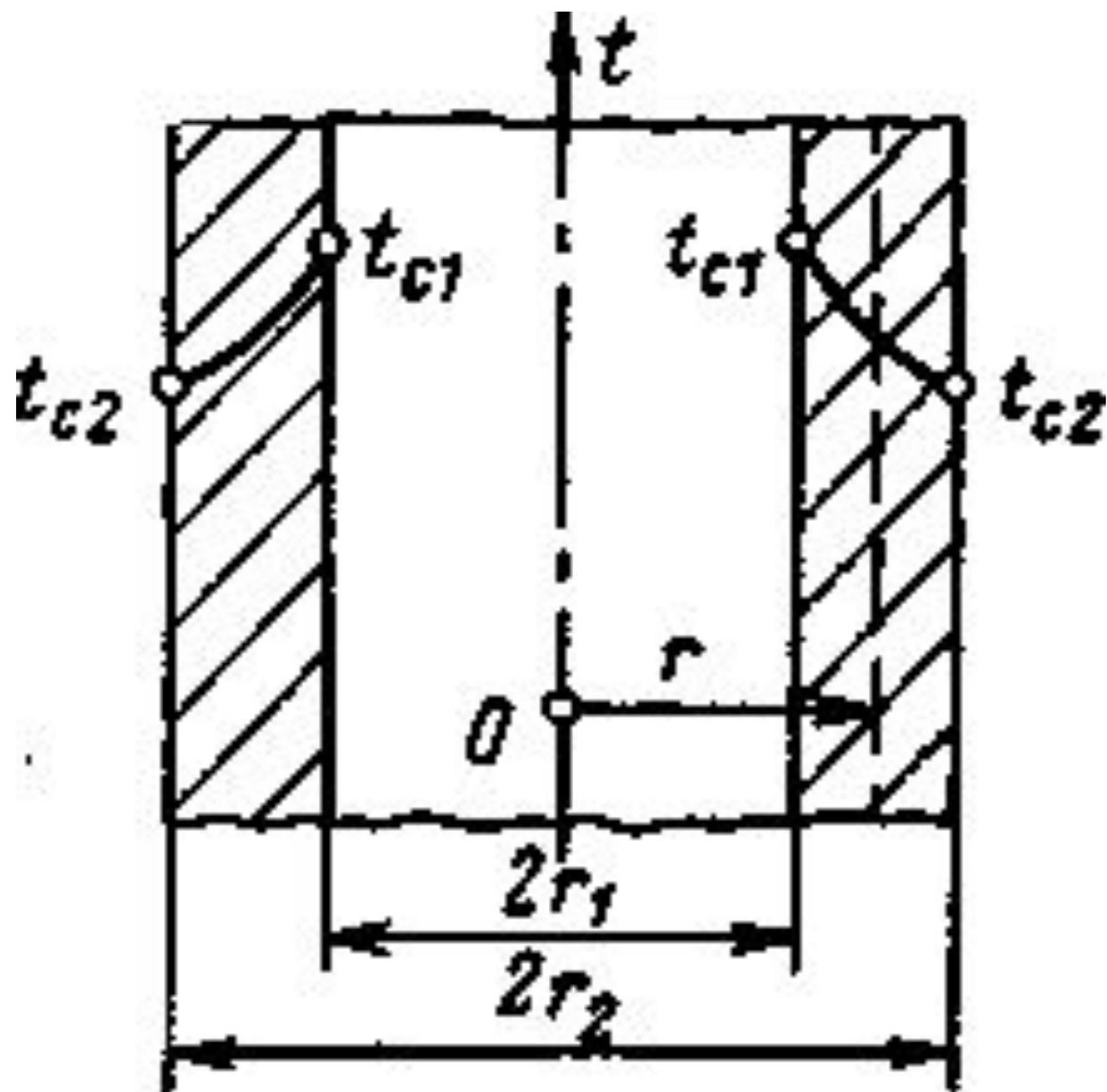
Теплопередача через многослойную стенку

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} \quad \text{Если} \quad k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}\right)}$$

 $q = k(t_{ж1} - t_{ж2})$

Полный тепловой поток

$$Q_{\tau} = k \cdot \Delta t \cdot F \cdot \tau$$



Теплопередача через цилиндрическую стенку

Полный тепловой поток
только через стенку

$$Q = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot \Delta(t_{c1} - t_{c2})}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

Линейная
плотность
теплового потока
через стенку
(отнесенная к
единице длины
трубы)

$$q_{\Delta} = \frac{2\lambda(t_{c1} - t_{c2})}{d_1 \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}$$

$$q = \alpha_1 \pi d_1 (t_{ж1} - t_{c1})$$

$$q = \frac{\pi(t_{c1} - t_{c2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}$$

$$q = \alpha_2 \pi d_2 (t_{c2} - t_{ж2})$$

Линейные плотности
теплового потока при
теплопередаче

$$k_{\boxtimes} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right)}$$

$$q_{\boxtimes} = k_{\boxtimes} \pi (t_{ж1} - t_{ж2})$$

Многослойная цилиндрическая стенка

- при $\lambda = \text{const}$. Используя принцип сложения сопротивлений, получим выражение для теплового потока Q через многослойную цилиндрическую стенку .
- где λ - теплопроводность i -го слоя; ΔT - полный перепад температур на внутренней и внешней поверхностях многослойной цилиндрической стенки; R_i , R_{i+1} - внутренний, наружный радиусы i -го слоя.

$$Q = \frac{2\pi l \cdot \Delta T}{\sum_1^n \frac{1}{\lambda_{w_i}} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i}}$$

- внутреннее сопротивление многослойной стенки
- Полный тепловой поток через стенку
- Перепад температур в i -ом слое стенки
- относительный перепад температур $\Delta T_i / \Delta T$

$$R_{\Sigma} = \sum_1^n \frac{1}{\lambda_{wi}} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i}$$

$$Q = \frac{2\pi \varnothing \cdot \Delta T}{R_{\Sigma}}$$

$$\Delta T_i = T_i - T_{i+1} = \frac{R_i}{2\pi \varnothing \lambda_{wi}} \frac{R_{i+1}}{R_i}$$

$$\frac{\Delta T_i}{\Delta T} = \frac{\frac{1}{\lambda_{wi}} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i}}{R_{\Sigma}}$$

- Общее термическое сопротивление многослойной цилиндрической стенки

$$R_{\Sigma}^* = \frac{1}{\alpha_1 R_1} + \sum_1^n \frac{1}{\lambda_{wi}} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i} + \frac{1}{\alpha_2 R_{n+1}}$$

- Полный тепловой поток через многослойную цилиндрическую стенку

$$Q = \frac{2\pi \cdot (T_{w1} - T_{w2})}{R_{\Sigma}^*}$$

КРИТИЧЕСКИЙ ДИАМЕТР ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТЕНКИ

- Общее термическое сопротивление цилиндрической стенки

$$R^* = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}$$

- зависит от внешнего диаметра трубы R_2 неоднозначно.
- Исследуя величину R^* на экстремум в зависимости от R_2 (при прочих постоянных величинах), получим

$$\frac{dR^*}{d(R_2)} = \frac{1}{\lambda_w R_2} - \frac{1}{\alpha_2 R_2^2} = \frac{1}{R_2} \left(\frac{1}{\lambda_w} - \frac{1}{\alpha_2 R_2} \right).$$

- Экстремальное значение имеет место при значении $d_2 = d_{кр}$ которое найдем из условия

$$dR^* / d(R_2) = 0,$$

$$\frac{1}{\lambda_w} - \frac{1}{\alpha_2 R_2} = 0 \Rightarrow \frac{1}{\lambda_w} = \frac{1}{\alpha_2 R_{кр}} \Rightarrow d_{кр} = \frac{2\lambda_w}{\alpha_2}$$

- Значение $d_{кр}$ может соответствовать min или max величины R в зависимости от знака 2-ой производной

$$\frac{d^2 R^*}{d(R_2^2)} \text{ при } R_2 = R_{кр}$$

$$\frac{d^2 R^*}{d(R_2^2)} = \frac{d}{d(R_2)} \left(\frac{dR^*}{d(R_2)} \right) = -\frac{1}{\lambda_w R_2^2} + \frac{2}{\alpha_2 R_2^3} = \frac{2}{R_2^2} \left(\frac{1}{\alpha_2 R_2} - \frac{1}{2\lambda_w} \right).$$

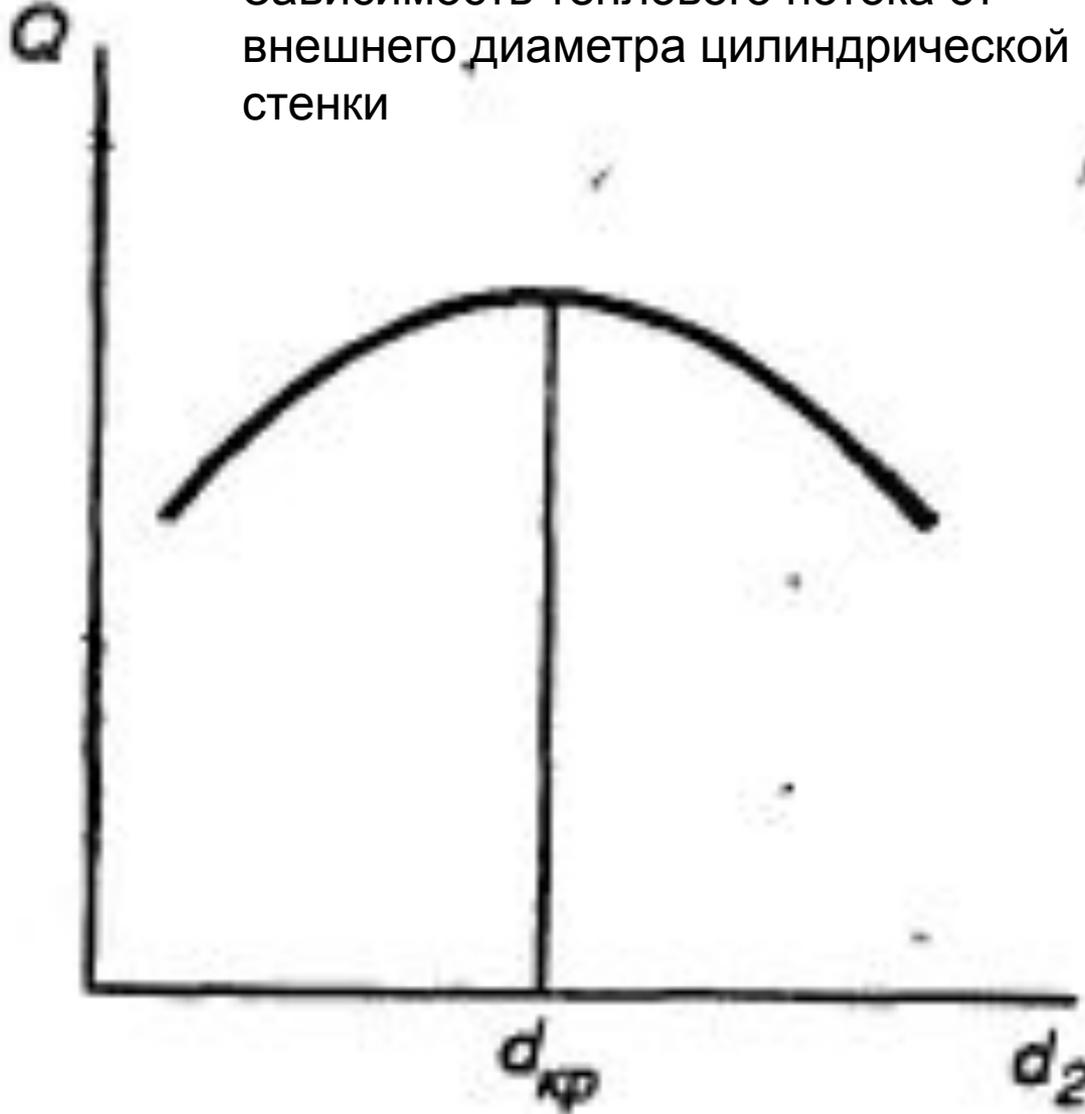
- Подставляя $R_2 = R_{кр}$ найдем знак величины в скобках

$$\frac{1}{\alpha_2 R_{кр}} - \frac{1}{2\lambda_w} = \frac{1}{\lambda_w} - \frac{1}{2\lambda_w} > 0.$$

- Так как вторая производная больше нуля, то значение $d_{кр}$ соответствует минимуму термического сопротивления и, соответственно максимуму тепловой проводимости и теплового потока.

- $d_2 = d_{кр}, R^* = R_{мин}^*, K_{\ell} = K_{\ell_{max}}, Q = Q_{max}.$

Зависимость теплового потока от внешнего диаметра цилиндрической стенки



1'
СТЬЮ

1 d_2
АТЬ

Критическая толщина ИЗОЛЯЦИИ

- Полученные соотношения позволяют выбрать оптимальную толщину изоляции и проанализировать влияние ее параметров на величину теплового потока. Если на внешней поверхности трубы имеется изоляция толщиной $\delta_{из}$ и теплопроводностью $\lambda_{из}$, то можно записать соотношение

$$R_2 + \delta_{кр,из} = \frac{\lambda_{из}}{\alpha_2}.$$

- Условие «хорошей» изоляции

$$\frac{2\lambda_{\text{из}}}{\alpha_2} \leq d_2.$$

- Изоляция считается эффективной, если термическое сопротивление изолированной трубы больше, чем неизолрированной

$$\frac{l}{\alpha_2 d_2} \leq \frac{l}{2\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_{\text{из}}}{d_2} + \frac{l}{\alpha_2 d_{\text{из}}}.$$

- Диаметр эффективной изоляции $d_{из}$ определим по соотношению

$$\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_{из}} = \frac{\alpha_2}{2\lambda_{из}} \ln \frac{d_{из}}{d_2}.$$

- Тепловой поток от неизолированной внешней поверхности трубы

$$Q = \frac{\pi \ell (T_{w2} - T_{f2})}{1/\alpha_2 d_2}.$$

- Тепловой поток от изолированной поверхности с толщиной изолированной

$$Q_{из} = \frac{\pi \ell (T_{w2} - T_{f2})}{\frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{(d_2 + 2\delta_{из})}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 (d_2 + 2\delta_{из})}}.$$

- Их отношения равны

$$\frac{Q_{из}}{Q} = \frac{1}{\frac{\alpha_2 d_2}{2\lambda_{из}} \ln\left(1 + \frac{\delta_{из}}{R_2}\right) + \frac{1}{1 + \delta_{из}/R_2}}.$$

- Выбрав какой-либо теплоизоляционный материал для покрытия цилиндрической поверхности, прежде всего нужно рассчитать критический диаметр для заданных $\lambda_{из}$ и α_2 .
- Если окажется, что значение $d_{кр}$ больше наружного диаметра трубы d_2 , то применение выбранного материала в качестве тепловой изоляции нецелесообразно. В области $d_2 < d_3 < d_{кр}$ при увеличении толщины изоляции будет наблюдаться увеличение теплотерь.
- Только при $d_3 = d_{3\text{эф}}$ тепловые потери вновь станут такими же, как для первоначального, неизолированного трубопровода. Следовательно, некоторый слой тепловой изоляции не будет оправдывать своего назначения.
- Значит, для эффективной работы тепловой изоляции необходимо, чтобы $d_{кр\text{ изоляции}} < d_2$

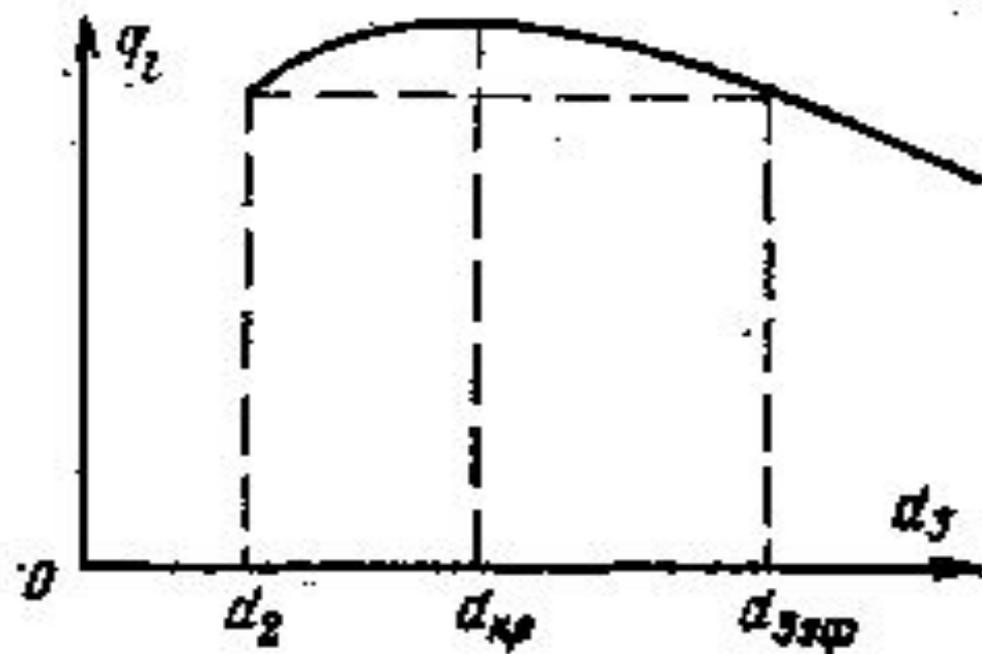


Рис. 2.10. Зависимость тепловых потерь от толщины изоляции, наложенной на цилиндрическую стенку.

Пример 8.2 Трубопровод с внешним диаметром $d_2=25$ мм охлаждается с поверхности, $\alpha_2=10$ Вт/(м²·К) Как изменится тепловой поток с поверхности в зависимости от толщины изоляции, если использовать:

асбест при $\lambda=0,16$ Вт/(м·К); стекловату при $\lambda=0,04$ Вт/(м·К).

Решение. Рассчитаем критический диаметр изоляции $d_{из\ кр}$ для указанных теплоизоляторов по соотношению (8.49)

$$\text{асбест, } d_{из\ кр} = \frac{2 \cdot 0,16}{10} = 32 \text{ мм, } d_{из\ кр} > d_2;$$

$$\text{стекловата, } d_{из,кр} = \frac{2 \cdot 0,04}{10} = 8 \text{ мм } d_{из,кр} < d_2.$$

$$d_{кр} = \frac{2\lambda_w}{\alpha_2}$$

Отсюда следует, что для асбеста увеличение толщины изоляции приведет сначала к увеличению теплового потока, и лишь по достижении $d_2 + 2\delta_{из} \geq d_{кр}$ (т.е. при $\delta_{из}=3,5$ мм) тепловой поток будет уменьшаться.

Для стекловаты $d_2 > d_{кр}$ и поэтому увеличение толщины изоляции ведет к монотонному снижению $Q_{из}$.

Результаты расчета величины $Q_{из}/Q=f(\delta_{из}/R_2)$ по (8.53) для двух указанных случаев приведены в табл. 1 и на рис. 8.10.

Зависимость теплового потока от толщины изоляции

$\delta_{из}/R_2$		0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,28	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0
$\delta_{из}, \text{ мм}$		0	0,625	1,25	1,875	2,5	3,5	3,75	5	6,25	10	12,5
$\frac{Q_{из}}{Q}$	асбест	1	1,0096	1,0167	1,0217	1,0249	1,0266	1,0265	1,0235	1,017	0,986	0,960
	стекловата	1	0,905	0,829	0,776	0,713	0,644	0,629	0,566	0,517	0,418	0,375

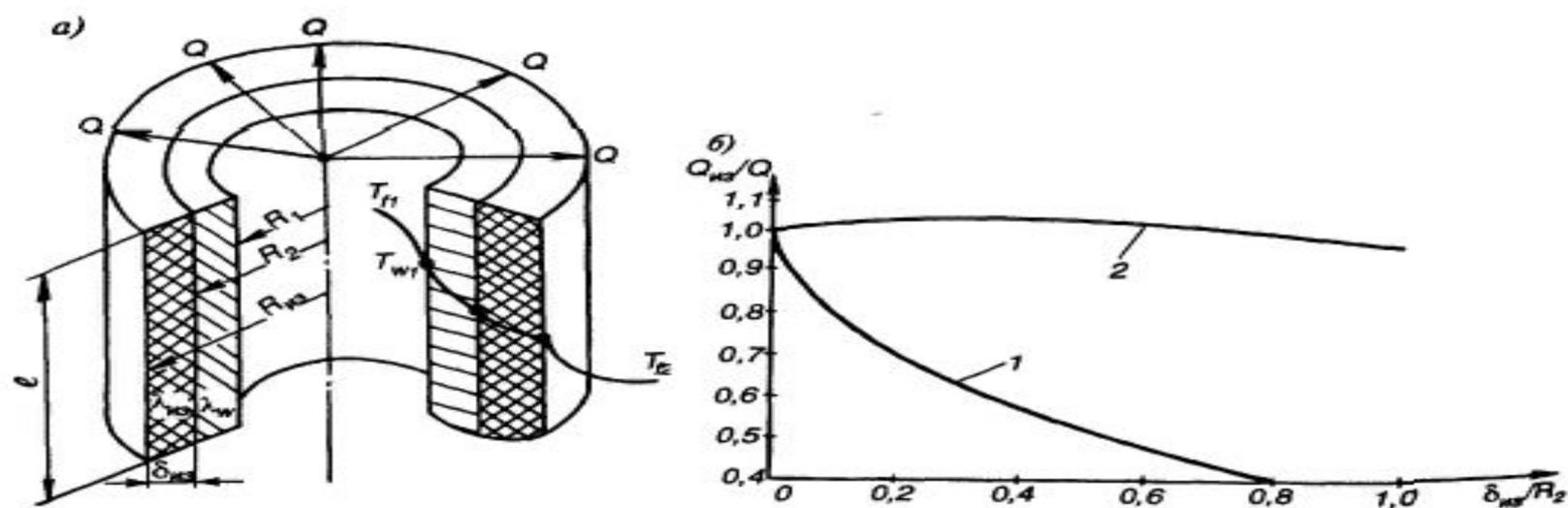


Рис. 8.10. Зависимость теплового потока от толщины цилиндрической изоляции: а - цилиндрическая стенка с изоляцией; б - зависимость относительного теплового потока $Q_{из}/Q$ от толщины изоляции: 1 - "хорошая" изоляция (стекловата); 2 - "плохая" изоляция (асбест)