ТЕПЛОМАССООБМЕН

Сложный теплообмен

Лекция № 4.2

2017 год

План

- 1. Критический диаметр изоляции.
- 2. Теплопередача через плоскую ребристую стенку.
- 3. Способы интенсификации процессов теплопередачи.

1. Критический диаметр изоляции

Тепловой изоляцией называют всякое покрытие горячей поверхности, которое способствует снижению потерь теплоты в окружающую среду.

- Для **тепловой изоляции** ***используют любые материалы с низкой теплопроводностью*** – асбест, пробка, слюда, шлаковая или стеклянная вата, шерсть и др.

- Анализ формулы ***полного линейного термического сопротивления теплопередачи цилиндрической стенки*** показывает, что **тепловые потери изолированных трубопроводов уменьшаются не пропорционально увеличению толщины изоляции**.

- **При неправильном выборе материала изоляции тепловые потери возрастут**.

- Это связано с тем, что у изолированного трубопровода внешняя поверхность увеличивается и условия теплоотвода улучшаются.

- Анализ показывает, что материал выбран правильно, если $\lambda_{из}$ удовлетворяет неравенству

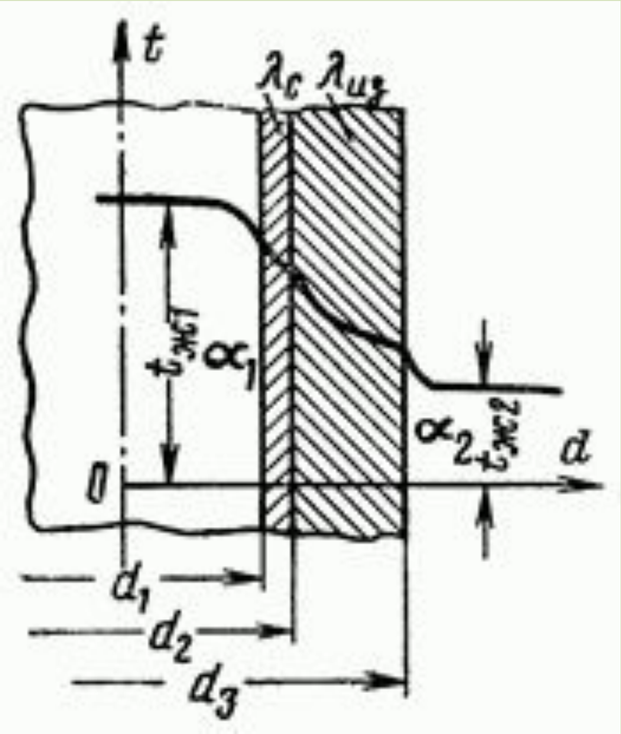
$$\boxed{\lambda_{из} < \frac{\alpha_2 d_2}{2},}$$

- где d_2 – наружный диаметр трубопровода, а α_2, и – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности к окружающей среде.

- ***Рассмотрим условие, при котором материал, используемый для изоляции трубы, будет уменьшать тепловые потери***.

- Цилиндрическая труба покрыта однослойной изоляцией.

- При постоянных α_1, α_2, d_1, d_2, λ_1, λ_2, t_1 и t_2 рассмотрим, как будет изменяться полное термическое сопротивление при изменении толщины изоляции.



- В уравнении **общего термического сопротивления теплопередачи** двухслойной цилиндрической стенки (трубопровода, на который наложен слой изоляции):

$$R_ц = \frac{1}{\kappa_ц} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}.$$

$$R_ц = \frac{1}{\kappa_ц} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}.$$

- Из формулы следует, что при наложении изоляции термическое сопротивление слоя изоляции возрастает на величину

$$\frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2}$$

это способствует снижению потерь теплоты, но одновременно термическое сопротивление теплоотдачи в окружающую среду уменьшается на величину

$$\frac{1}{\alpha_2}\left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3}\right)$$

- что связано с увеличением внешней поверхности ($d_3 > d_2$).

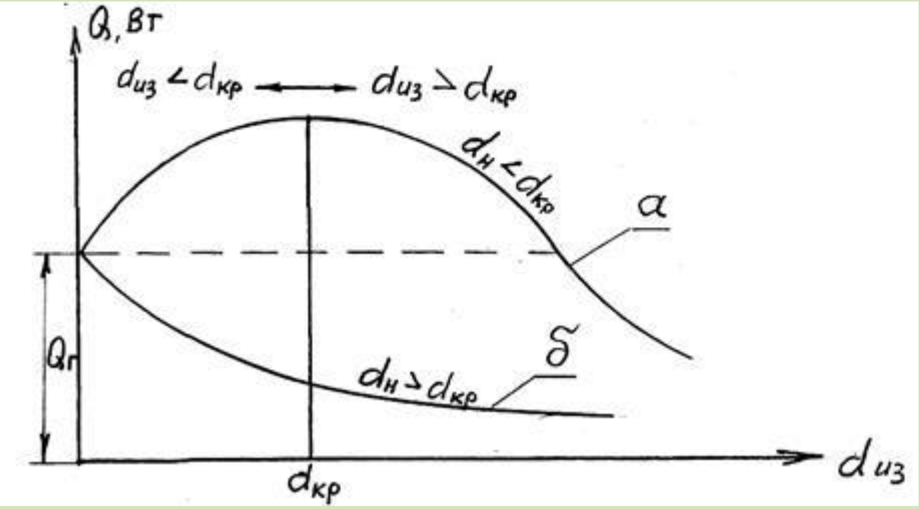
$$R_{ц} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}.$$

- Возьмем первую производную от правой части уравнения по d_3 и приравнивая ее к нулю, получаем:

$$\frac{d\left(R_{ц}\right)}{d\left(d_3\right)} = \frac{1}{2\lambda_2 d_3} - \frac{1}{\alpha_2 d_3^2} = 0.$$

Критический диаметр изоляции, отвечающий экстремальной точке кривой

$$\boxed{R = f(d_3),}$$

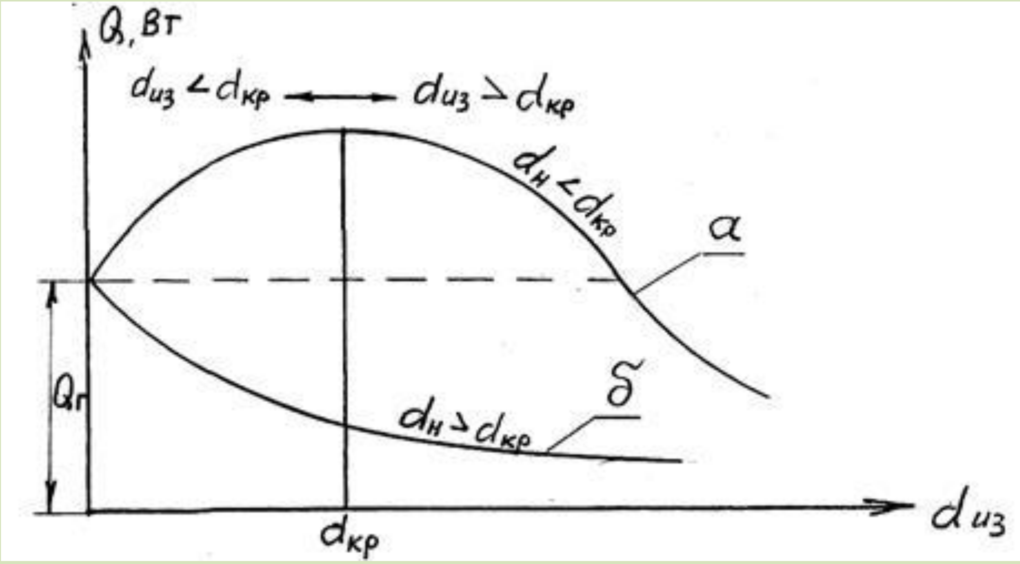


определяется формулой:

$$\boxed{d_{кр} = d_{из} = d_2 = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_2}.}$$

Из формулы следует: ***критический диаметр изоляции не зависит от размеров трубопровода***.

$$d_{кр} = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_2}.$$



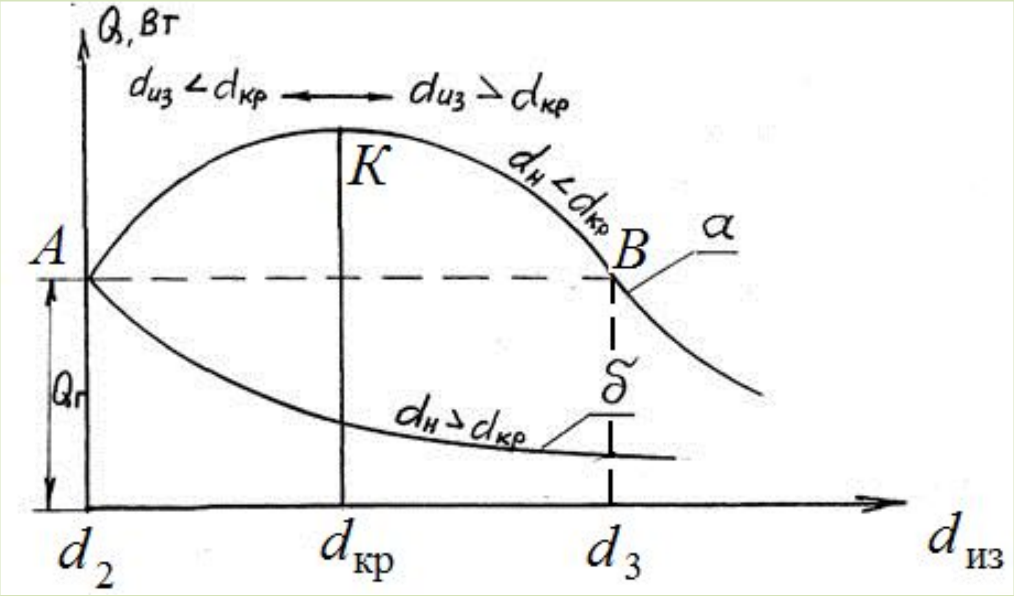
Критический диаметр тем меньше, чем меньше теплопроводность изоляции и чем больше теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к окружающей среде.

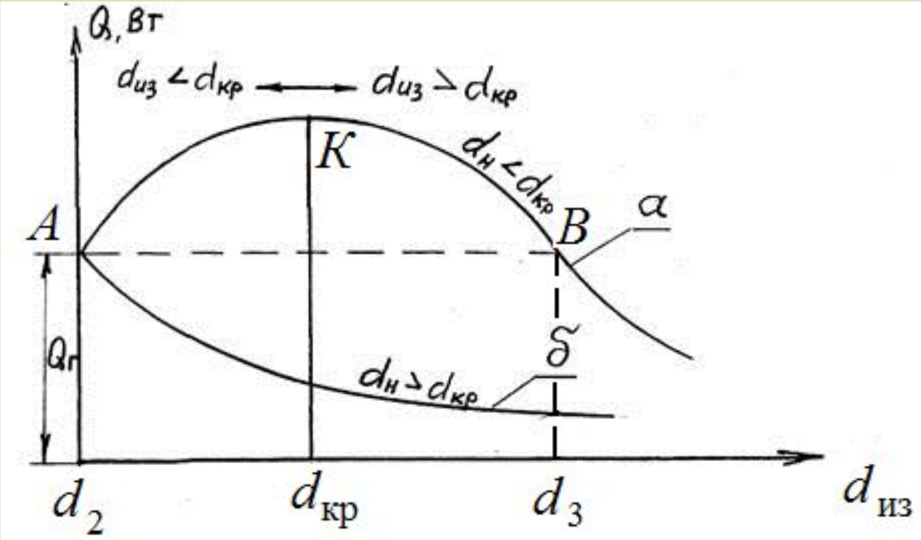
Если вторая производная от $R_ц$ больше нуля. Следовательно, **критический диаметр** соответствует минимуму теплового сопротивления и максимуму теплового потока.

Анализ уравнения

$$d_{\text{кр}} = \frac{2\lambda_{\text{из}}}{\alpha_2}$$

показывает, что если наружный диаметр изоляции $d_{\text{из}}$ увеличивается, но остается меньше $d_{\text{кр}}$, то тепловые потери возрастают и будут больше тепловых потерь голого трубопровода (кривая AK).





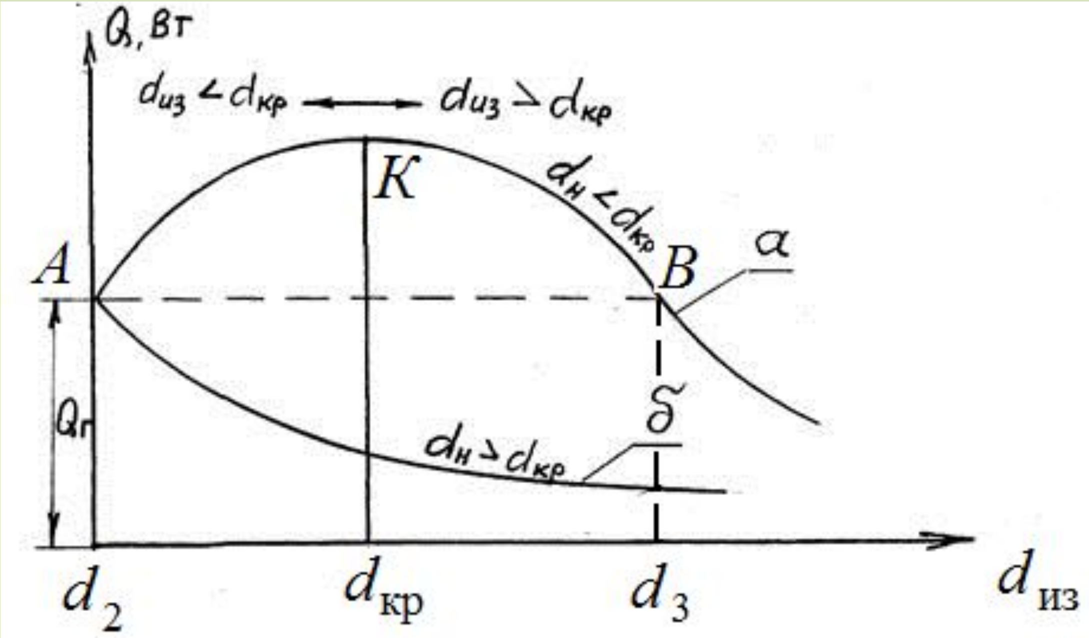
При равенстве $d_{из}=d_{кр}$ получаются максимальные тепловые потери в окружающую среду (точка *K*).

При дальнейшем увеличении наружного диаметра изоляции $d_{из}>d_{кр}$ теплопотери будут меньше, чем при $d_{из}=d_{кр}$ (кривая *BK*).

Только при $d_{из}=d_3$ тепловые потери вновь станут такими же, как и для неизолированного трубопровода.

- Для эффективной работы изоляции необходимо, чтобы критический диаметр был меньше внешнего диаметра оголенного трубопровода, т.е. чтобы выполнялось условие:

$$\boxed{d_{\text{кр}} \le d_2}$$



- Для того чтобы изоляция вызывала уменьшение теплопотерь цилиндрической стенки по сравнению с голым трубопроводом, при данном наружном диаметре трубы d_2 и заданным коэффициентом теплоотдачи α_2 необходимо, чтобы

$$\boxed{\lambda_{из} \le \frac{\alpha_2 d_2}{2}.}$$

Характер изменения тепловых потерь трубопровода q_l в зависимости от толщены слоя $\boldsymbol{\delta}_{из} = 0{,}5(d_3 - d_2)$ при рациональном и неверном подборе материала показан на рисунке

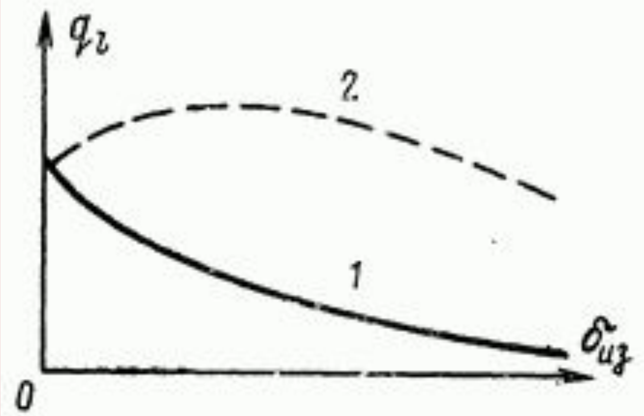


Рис. 6-16. Зависимость тепловых потерь трубопровода q_l от толщины слоя изоляции $\delta_{из} = 0{,}5\,(d_{из} - d_2)$ при рациональном (*1*) и неправильном (*2*) подборе материала изоляции.

Пример

- Для изоляции трубопровода диаметром $d_2 = 30$ мм имеется шлаковая вата, теплопроводность которой $\lambda_{из} = 0{,}1$ Вт/(м·К), коэффициент теплоотдачи $\alpha_2 = 4{,}0$ Вт/(м^2·К).
- Целесообразно ли применять в данном случае в качестве изоляции шлаковую вату?

Пример

- Критический диаметр изоляции

$$d_{\text{кр}} = \frac{2\boldsymbol{\lambda}_{\text{из}}}{\boldsymbol{\alpha}_2} = \frac{2 \cdot 0{,}1}{4} = 0{,}05\ \text{м} = 50\ \text{мм}.$$

Так как $d_{\text{кр}} > d_2$, шлаковую вату в рассматриваемом случае применять нецелесообразно.

- Для нашей задачи $\lambda_{\text{из}}$ должна быть меньше

$$\boldsymbol{\lambda}_{\text{из}} \le \frac{\boldsymbol{\alpha}_2 \cdot d_2}{2} = \frac{4 \cdot 0{,}03}{2} = 0{,}06 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right).$$

2. Теплопередача через плоскую ребристую стенку

Ребристые поверхности применяются для выравнивания термических сопротивлений теплоотдачи с обеих сторон стенки, когда одна поверхность омывается капельной жидкостью с большим коэффициентом теплоотдачи, а другая поверхность омывается газом с малым коэффициентом теплоотдачи, создающим большое термическое сопротивление.

- Оребрение стенки с большим термическим сопротивлением позволяет:

✔ **увеличить ее поверхность соприкосновения с горячим (или холодным) теплоносителем**;

✔ **уменьшить общее тепловое сопротивление теплопередачи**;

✔ **увеличить тепловые потоки**.

- Температура ребер изменяется по высоте, если $t_1 > t_2$.

- У основания ребра температура равна температуре поверхности стенки $t'_{ст}$.

- У вершины ребра температура будет значительно меньше и равна $t''_{ст}$.

- Участки поверхности ребра у основания передают больше теплоты, чем участки у ребра вершины.

- Отношение **количества теплоты** $Q_{Тр}$, ***передаваемой поверхностью ребер в окружающую среду***, **к теплоте** $Q_{Тп.р.}$, ***которую эта поверхность могла передать при постоянной температуре***, равной температуре у основания ребер, называется ***коэффициентом эффективности ребер***:

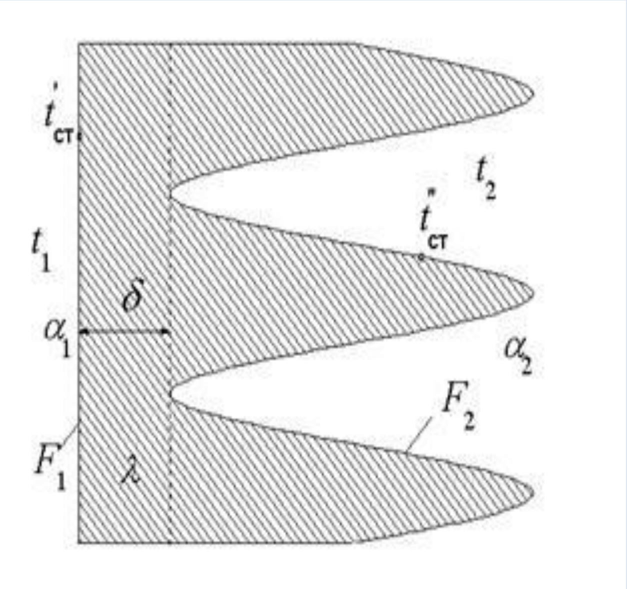
$$\boxed{\eta_{э} = Q_{Тр} / Q_{Тп.р.}}$$

- ***Коэффициент эффективности ребер*** **всегда меньше единицы**.

Для коротких ребер, выполненных из материала с высокой теплопроводностью, коэффициент эффективности близок к единице.

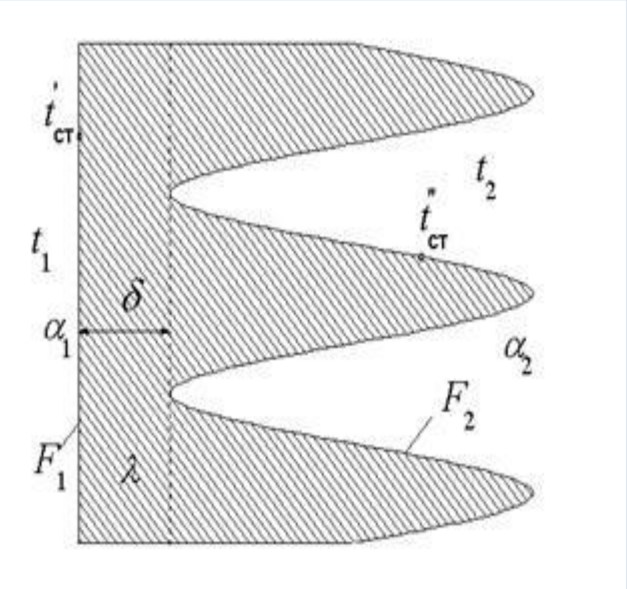
Рассмотрим плоскую стенку толщиной δ, на одной стороне которой имеются ребра.

Температура гладкой поверхности ребер и простенков между ними принимается в первом приближении равной постоянной величине $t''_{\text{ст}}$.



Стенка и ребра выполнены из одного материала с высокой теплопроводностью λ.

- Коэффициент теплоотдачи на гладкой стороне α_1.
- Коэффициент теплоотдачи ребер α_2.
- Площадь гладкой поверхности F_1.
- Площадь поверхности ребер и промежутков между ними F_2.
- Температура горячего теплоносителя t_1.
- Температура холодного теплоносителя t_2.



- Для стационарного режима можно записать три уравнения **теплового потока**:

$$Q = \boldsymbol{\alpha}_1 F_1 \left(t_1 - t'_{\text{ст}} \right),$$

$$Q = \frac{\boldsymbol{\lambda}}{\boldsymbol{\delta}} F_1 \left(t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}} \right),$$

$$Q = \boldsymbol{\alpha}_2 F_2 \left(t''_{\text{ст}} - t_2 \right).$$

- Решая уравнения относительно разности температур и складывая, получаем:

$$\boxed{Q = \frac{(t_1 - t_2)}{\left(\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{\delta}{\lambda F_1} + \frac{1}{\alpha_2 F_2}\right)},}$$

- или

$$\boxed{Q = \kappa_{\text{р}}(t_1 - t_2),}$$

где $\kappa_{\text{р}}$ – коэффициент теплопередачи для ребристой стенки.

$$\boxed{[\kappa_{\text{р}}] = 1\frac{\text{Вт}}{\text{К}}.}$$

- коэффициент теплопередачи для ребристой стенки

$$\mathbf{\kappa}_{\text{р}} = \frac{1}{\left(\dfrac{1}{\boldsymbol{\alpha}_1 F_1} + \dfrac{\boldsymbol{\delta}}{\boldsymbol{\lambda} F_1} + \dfrac{1}{\boldsymbol{\alpha}_2 F_2}\right)},$$

- **Тепловой поток** отнесеннный к единице ***гладкой поверхности***, то коэффициент теплопередачи для ребристой стенки равен

$$\boxed{\kappa_{р.г} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\frac{F_1}{F_2}\right)},}$$

- **Тепловой поток** отнесённный к единице ***ребристой поверхности***, то коэффициент теплопередачи для ребристой стенки равен

$$\boxed{\kappa_{р.р} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1}\frac{F_2}{F_1} + \frac{\delta}{\lambda}\frac{F_2}{F_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)},}$$

- Для круглой трубы с наружным оребрением:

$$Q = \boldsymbol{\kappa}_{\text{р.к}}\left(t_1 - t_2\right),$$

- откуда

$$\boldsymbol{\kappa}_{\text{р.к}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\boldsymbol{\alpha}_1 d_1} + \frac{1}{2\boldsymbol{\lambda}}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{F_1}{\boldsymbol{\alpha}_2 d_2 F_2}\right)},$$

где d_1 – внутренний диаметр трубы; d_2 – наружный диаметр трубы.

$$\left[\boldsymbol{\kappa}_{\text{р.к}}\right] = 1\frac{\text{Вт}}{(\text{м}\cdot\text{К})}.$$

Приведенные формулы справедливы для ребер небольшой высоты.

- Отношение оребренной поверхности F_2 к гладкой F_1 называется ***коэффициентом оребрения***.

Точное значение коэффициента теплопередачи для ребристых поверхностей может быть определено только экспериментальным путем.

- **Пример**.

- Определить количество теплоты, передаваемое через 1 м^2 ребристой стенки, коэффициент оребрения которой F_2/F_1=12.

✔ Стенка выполнена из чугуна с теплопроводностью λ=63 Вт/(м·К) и толщиной δ=12 мм.

✔ Коэффициент теплоотдачи от рабочего тела к стенке α_1=250 Вт/(м^2·К) и α_2=12 Вт/(м^2·К).

✔ Температура рабочего тела t_1=117°С, а температура воздуха t_2=17°С.

- ***Решение***.
- Коэффициент теплопередачи определяем по формуле:

$$\kappa_{р.г} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\frac{F_1}{F_2}\right)},$$

✔ Считаем, что тепловой поток отнесен к гладкой поверхности.

$$\kappa_{р.г} = \frac{1}{\left(\frac{1}{250} + \frac{0{,}012}{63} + \frac{1}{12}\cdot\frac{1}{12}\right)} = 90\,\frac{Вт}{\left(м^2\cdot К\right)}.$$

- Плотность теплового потока определяем по уравнению:

$$q = \kappa_{р.г}\left(t_1 - t_2\right) = 90\cdot\left(117 - 17\right) = 9000\,\frac{Вт}{м^2}.$$

- При гладкой поверхности стенки к определяем по уравнению:

$$\mathbf{к} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{250} + \frac{0{,}012}{63} + \frac{1}{12}\right)} = 11{,}4\ \frac{\text{Вт}}{\left(\text{м}^2 \cdot \text{К}\right)}.$$

- Плотность теплового потока для гладкой стенки

$$q = \mathbf{к}\left(t_1 - t_2\right) = 11{,}4 \cdot \left(117 - 17\right) = 1140\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

 Оребрение стенки увеличило теплопередачу в 7,9 раза.

✔ В действительности с учетом изменения коэффициента теплоотдачи и температуры вдоль ребра эффект от оребрения может быть значительно меньше.

3. Интенсификации процессов теплопередачи

Практика эксплуатации тепловых аппаратов требует наилучших условий передачи теплоты от горячего теплоносителя к холодному.

При решении практических задач теплопередачи в одних случаях требуется интенсифицировать процесс, в других, наоборот, всячески тормозить.

- Возможности осуществления требований к интенсификации процессов теплопередачи вытекают из закономерностей протекания основных способов передачи теплоты.

- **Термическое** сопротивление стенки можно уменьшить путем уменьшения толщины стенки и увеличения коэффициента теплопроводности материала.

$$R = \frac{\delta}{\lambda}.$$

- **Теплоотдача** соприкосновением может быть интенсифицирована путем перемешивания жидкости и увеличения скорости движения.

- **При тепловом излучении** – путем повышения степени черноты и температуры излучающей поверхности.

- Вопрос о путях интенсификации процесса теплопередачи более сложный.

- Правильное его решение может быть получено лишь на основе тщательного анализа частных условий теплопередачи.

Пример:

Рассмотрим формулу коэффициента теплопередачи для плоской стенки:

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

$$R = \frac{\delta}{\lambda} = 0$$

- Если термическим сопротивлением стенки пренебречь, то формула коэффициента теплопередачи примет вид:

$$\kappa = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2},$$

отсюда следует, что коэффициент теплопередачи всегда меньше самого малого из коэффициентов теплоотдачи.

- Выявив частные термические сопротивления, можно найти и решение задачи об интенсификации теплопередачи.

- **Пример 1**.

В паровом котле коэффициент теплоотдачи от топочных газов к стенке равен α_1=30 Вт/(м^2·К), а от стенки к кипящей воде α_2=5000 Вт/(м^2·К), теплопроводность стальной стенки λ=50 Вт/(м·К), толщина стенки δ=0,02 м. Стенку считаем плоской.

- При этих условиях коэффициент теплопередачи **к**=29,5 Вт/(м^2·К), т.е. он меньше наименьшего **α**.

- **Пример 1**.

- Если для увеличения коэффициента теплопередачи **к** улучшить условия теплоотдачи от стенки к воде или применять более тонкую стенку из теплопроводного материала, то этими способами увеличить **к** не удается.

- **Существенно повысить к можно лишь тогда**, ***когда улучшим передачу теплоты от топочных газов к стенке***.

- **Пример 2**.

- Рассмотрим аппараты, в которых коэффициенты $\boldsymbol{\alpha_1}$ и $\boldsymbol{\alpha_2}$ велики.

В водяном конденсаторе со стороны воды α_1=5000 Вт/(м^2·К), а со стороны пара α_2=10000 Вт/(м^2·К).

- Если стенку такого конденсатора изготовить из стали толщиной 20 мм, то **к**=1428 Вт/(м^2·К),

- если взять стенку толщиной 3 мм, то **к**=2770 Вт/(м^2·К),

- а если сталь заменить красной медью и взять стенку толщиной 1 мм, то **к**=3400 Вт/(м^2·К).

- **Пример 2**.
- Данный пример показывает, ***что при больших значениях коэффициентов теплоотдачи коэффициент теплопередачи в значительной степени зависит от теплопроводности стенки***.

- ***При изучении условий передачи теплоты в тепловых аппаратах для интенсификации теплопередачи необходимо стремиться уменьшить наибольшее сопротивление***.