

Лекция 9. Теплопередача

Остренко С.А.

Для студентов специальности
190702 (240400.01) Организация и безопасность движения
(Автомобильный транспорт)

Введение

Теплопередачей называют перенос теплоты от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку.

Этот процесс раскладывают на:

- перенос теплоты от горячего теплоносителя к стенке;
- перенос теплоты через стенку;
- перенос теплоты от стенки к холодному теплоносителю.

Повестка дня

- Теплопередача через однородную плоскую стенку.
- Теплопередача через многослойную плоскую стенку.
- Теплопередача через однородную цилиндрическую стенку.
- Теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку.
- Тепловая изоляция. Критический диаметр изоляции. Условие рационального выбора материала для тепловой изоляции трубопровода.

Обзор

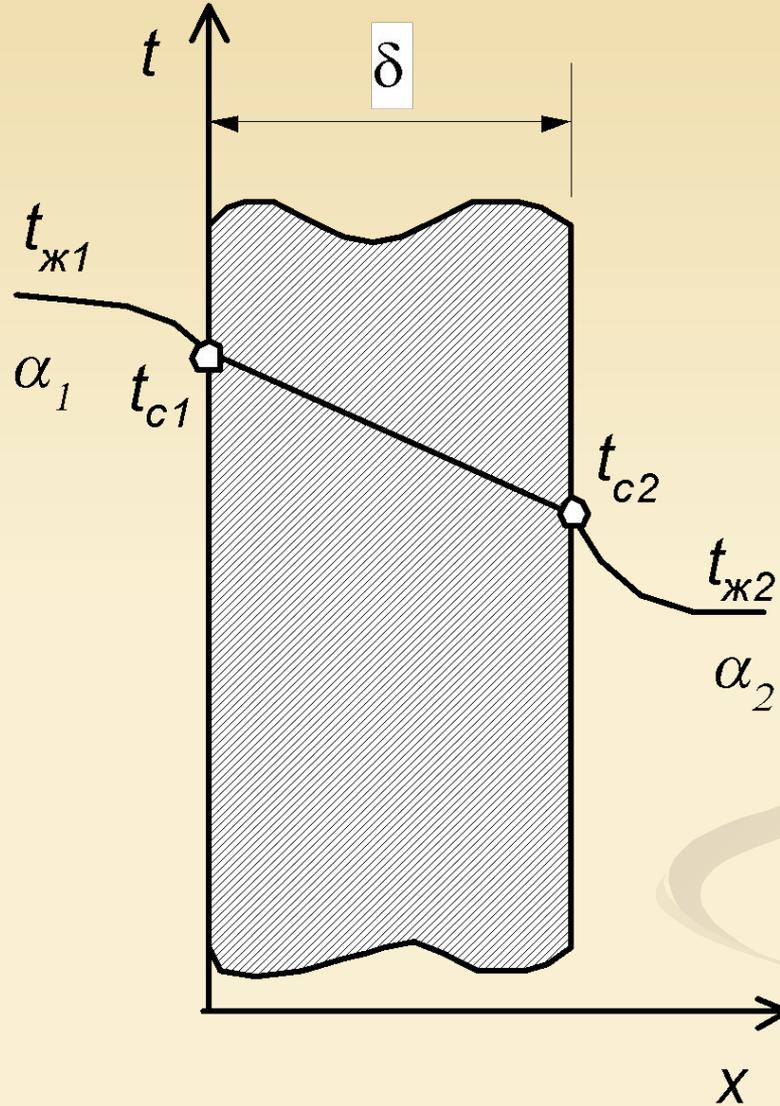
Ранее рассмотрены вопросы переноса теплоты теплопроводностью и в процессе конвективного теплообмена, частным случаем которого является процесс теплоотдачи.

Теплопередача через стенки представляет собой теплопроводность через них при граничных условиях третьего рода – когда заданы температуры горячего и холодного теплоносителей и коэффициенты теплоотдачи к ним.

Теплопередача через однородную плоскую стенку

В многочисленных практических задачах обычно известной является не температура поверхности стенки, а температуры $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$ сред, омывающих эти поверхности и коэффициенты теплоотдачи к ним α_1 и α_2 .

Температуры поверхностей стенки неизвестны, обозначим их $t_{с1}$ и $t_{с2}$.



Теплопередача через однородную плоскую стенку

Теплопередача через однородную плоскую стенку

Сложный процесс переноса теплоты от одной среды через стенку к другой среде (теплопередачу) состоит из трех этапов:

- теплоотдачи от среды с температурой $t_{ж1}$ к поверхности стенки, имеющей температуру $t_{с1}$;
- теплопроводности через стенку;
- теплоотдачи от поверхности стенки с температурой $t_{с2}$ к среде, имеющей температуру $t_{ж2}$.

Теплопередача через однородную плоскую стенку

Первый и третий этапы процесса описываются законом Ньютона - Рихмана, второй – формулой теплопроводности через однородную плоскую стенку.

В стационарных условиях тепловые потоки, передаваемые от горячего теплоносителя к стенке, через стенку и от стенке холодному теплоносителю равны!

Теплопередача через однородную плоскую стенку

Итак, тепловой поток, передаваемый от горячего теплоносителя к стенке равен

$$Q = \alpha_1 (t_{ж1} - t_{c1}) F$$

Тепловой поток, проходящий через стенку

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

Тепловой поток, передаваемый холодному теплоносителю от поверхности стенки

$$Q = \alpha_2 (t_{c2} - t_{ж2}) F$$

Теплопередача через однородную плоскую стенку

Эту систему можно переписать так, чтобы в левой части каждого равенства осталась разность температур. Тогда:

$$t_{ж1} - t_{c1} = \frac{Q}{F} \frac{1}{\alpha_1};$$

$$t_{c1} - t_{c2} = \frac{Q}{F} \frac{\delta}{\lambda};$$

$$t_{c2} - t_{ж2} = \frac{Q}{F} \frac{1}{\alpha_2}.$$

Теплопередача через однородную плоскую стенку

Эти формулы могут быть использованы для вычисления температур t_{c1} и t_{c2} .

Если просуммировать левые и правые части этих уравнений, то получим

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

Теплопередача через однородную плоскую стенку
откуда

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

где

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

– коэффициент теплопередачи.

Теплопередача через однородную плоскую стенку

Коэффициент теплопередачи в отличие от коэффициентов теплопроводности и температуропроводности не является теплофизической характеристикой хотя бы потому, что зависит от толщины стенки.

k численно равен количеству теплоты, которая передается от одной среды к другой через стенку площадью 1 м^2 в единицу времени при единичной разности температур между теплоносителями.

Теплопередача через однородную плоскую стенку

Величину, обратную k , называют термическим сопротивлением теплопередаче:

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

Из этой формулы видно, что полное термическое сопротивление теплопередаче состоит из трех частей: сопротивлений теплоотдаче $1/\alpha_1$ и $1/\alpha_2$ и термического сопротивления теплопроводности.

Теплопередача через многослойную плоскую стенку

Рассмотрение данной задачи аналогично предыдущей. Отличие состоит в том, что вместо одного слоя стенка состоит из нескольких слоев, поэтому в формуле для коэффициента теплопередачи в знаменатель будет входить вместо термического сопротивления одного слоя сумма термических сопротивлений теплопроводности всех слоев.

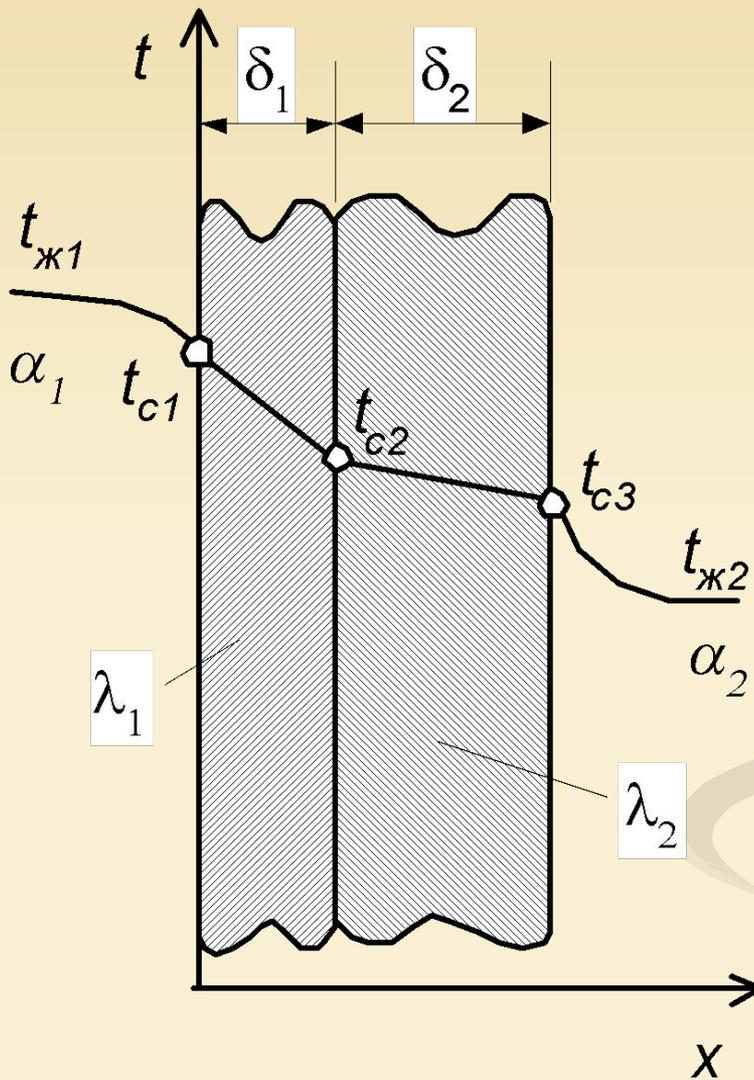


Рис. Теплопередача через многослойную плоскую стенку

Теплопередача через многослойную плоскую стенку

Таким образом, для теплового потока, передаваемого через многослойную плоскую стенку, справедливо уравнение

$$Q = k (t_{ж1} - t_{ж2}) F$$

которое верно и для однослойной стенки.

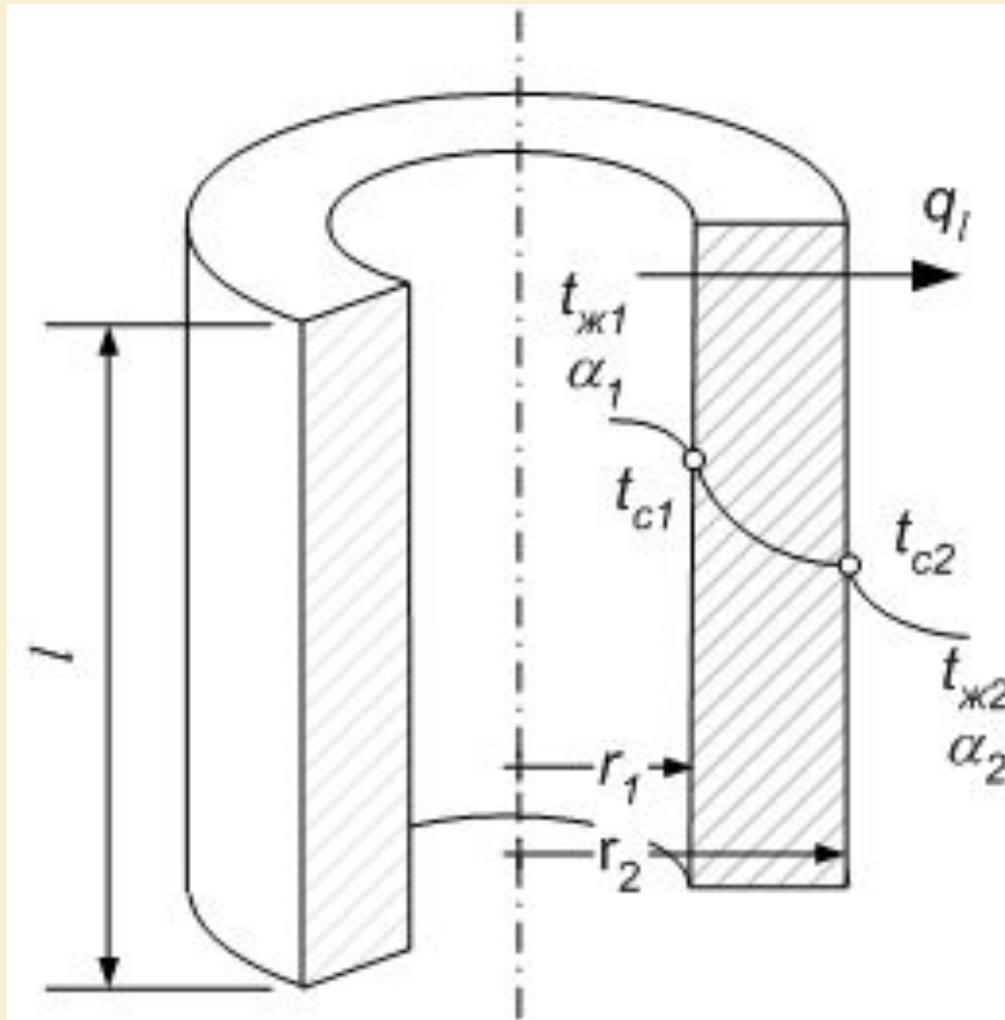
Отличие состоит в том, что для многослойной стенки коэффициент теплопередачи равен

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Теплопередача через многослойную плоскую стенку

В каждом слое многослойной стенки температура изменяется по закону прямой, однако угол наклона прямой к оси x будет в каждом слое различен, так как различны значения δ и λ .

Теплопередача через однородную цилиндрическую стенку



Теплопередача через однородную цилиндрическую стенку

Задача решается аналогично тому, как это делалось для плоской стенки. Примем $t_{ж1} > t_{ж2}$, т.е. теплота передается изнутри трубы наружу. Тогда линейная плотность теплового потока, передаваемого средой к внутренней поверхности стенки, равна

$$q_{\text{вн}} = \alpha_{\text{вн}} (t_{\text{ж1}} - t_{\text{ст1}}) 2\pi r_1$$

Теплопередача через однородную цилиндрическую стенку

Линейная плотность теплового потока,
передаваемого через стенку трубы

$$q_l = \frac{2\pi\lambda (t_{c1} - t_{c2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

Линейная плотность теплового потока,
передаваемого наружной поверхностью
трубы среде

$$q_t = \alpha_{\text{ж}} (t_1 - t_2) 2\pi r_2$$

Теплопередача через однородную цилиндрическую стенку

Полученную систему перепишем так, чтобы в левой части каждого уравнения осталась только разность температур:

$$t_{ж1} - t_{c1} = \frac{q_l}{\pi \alpha_1 d_1};$$

$$t_{c1} - t_{c2} = \frac{q_l}{\pi 2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1};$$

$$t_{c2} - t_{ж2} = \frac{q_l}{\pi \alpha_2 d_2}.$$

Теплопередача через однородную цилиндрическую стенку

Суммируя, левые и правые части этих уравнений, найдем

$$t_{ж1} - t_{ж2} = \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right)$$

откуда получим расчетную формулу для теплового потока

$$q_l = \frac{\pi (t_{ж1} - t_{ж2})}{\left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right)}$$

Теплопередача через однородную цилиндрическую стенку

Обозначим

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

Тогда уравнение для линейной плотности теплового потока примет вид:

$$q_{\text{л.т.п.}} = k_l \pi (t_1 - t_2)$$

Теплопередача через однородную цилиндрическую стенку

Величина k_l называется линейным коэффициентом теплопередачи.

Единица его измерения – Вт/(м К).

Коэффициент k_l численно равен теплоте, которая проходит через стенку трубы длиной 1 м в единицу времени от одной среды к другой при единичной разности температур между ними.

Величина, обратная линейному коэффициенту теплопередачи, называется линейным термическим сопротивлением; оно равно

$$R_l = \frac{1}{k_l} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}$$

Теплопередача через однородную цилиндрическую стенку

Величины

$$\frac{\pi d_1}{\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad \text{и} \quad \frac{1}{\alpha_2 d_2}$$

называют линейными термическими сопротивлениями теплоотдаче;

$$\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$$

– линейным термическим сопротивлением теплопроводности.

Теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку.

Совершенно так же, как это было сделано для однослойной стенки, можно вывести формулу для трубы, состоящей из n слоев.

$$q_l = \frac{\pi (t_{жс1} - t_{жс2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}$$

Теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку

Здесь индекс i указывает номер произвольного i -го слоя, при этом d_{i+1} и d_i – наружный и внутренний диаметр i -го слоя.

Тепловая изоляция. Критический диаметр изоляции. Условие рационального выбора материала для тепловой изоляции трубопровода.

Тепловой изоляцией называют любое покрытие теплоотдающей поверхности, которое приводит к снижению потерь теплоты в окружающую среду.

Кроме снижения потерь теплоты, тепловая изоляция должна обеспечить безопасное значение температуры поверхности, с которой возможен контакт человека.

Тепловая изоляция...

К материалам, используемым в качестве тепловой изоляции, предъявляют следующие требования:

- они должны иметь низкий коэффициент теплопроводности;
- иметь достаточную механическую прочность;
- быть термостойкими и пожаробезопасными;
- не впитывать влагу (быть гидрофобными).

Тепловая изоляция...

Если не удастся подобрать материал, обладающий перечисленными свойствами, то тепловую изоляцию делают многослойной (композитной).

У такой изоляции каждый слой выполняет только некоторые функции, например, один слой обеспечивает прочность конструкции, другой – высокое термическое сопротивление теплопроводности, третий – защищает от попадания влаги ...

Тепловая изоляция...

В практике часто требуется уменьшить тепловой поток через ограждающие стенки. Для этого на них наносят дополнительный теплоизолирующий слой какого-нибудь материала.

Если такой слой наносится на плоскую стенку, площадь поверхности теплообмена не изменяется в направлении теплового потока, и поэтому не возникает вопроса о принципиальной пригодности того или иного материала для тепловой изоляции стенки. Любой материал в той или иной степени уменьшит тепловой поток.

Тепловая изоляция...

При нанесении дополнительного слоя на цилиндрическую стенку одновременно с ростом сопротивления теплопроводности наблюдаются увеличение наружной теплоотдающей поверхности и вследствие этого уменьшение сопротивления теплоотдаче к внешней среде.

Тепловая изоляция...

Поэтому результат нанесения дополнительного слоя может быть двояким: в зависимости от теплопроводящих свойств материала этого слоя суммарный тепловой поток через изолированный цилиндр может, как уменьшаться, так и увеличиваться. Отсюда возникает вопрос о выборе материала, пригодного для тепловой изоляции цилиндра.

Тепловая изоляция...

Предположим, что мы имеем трубу с внутренним диаметром d_1 и наружным d_2 , которую нужно изолировать для уменьшения тепловых потерь. Обозначим наружный диаметр изоляции через d_3 (внутренним диаметром изоляции, естественно, будет d_2), тогда полное линейное термическое сопротивление изолированного трубопровода

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}$$

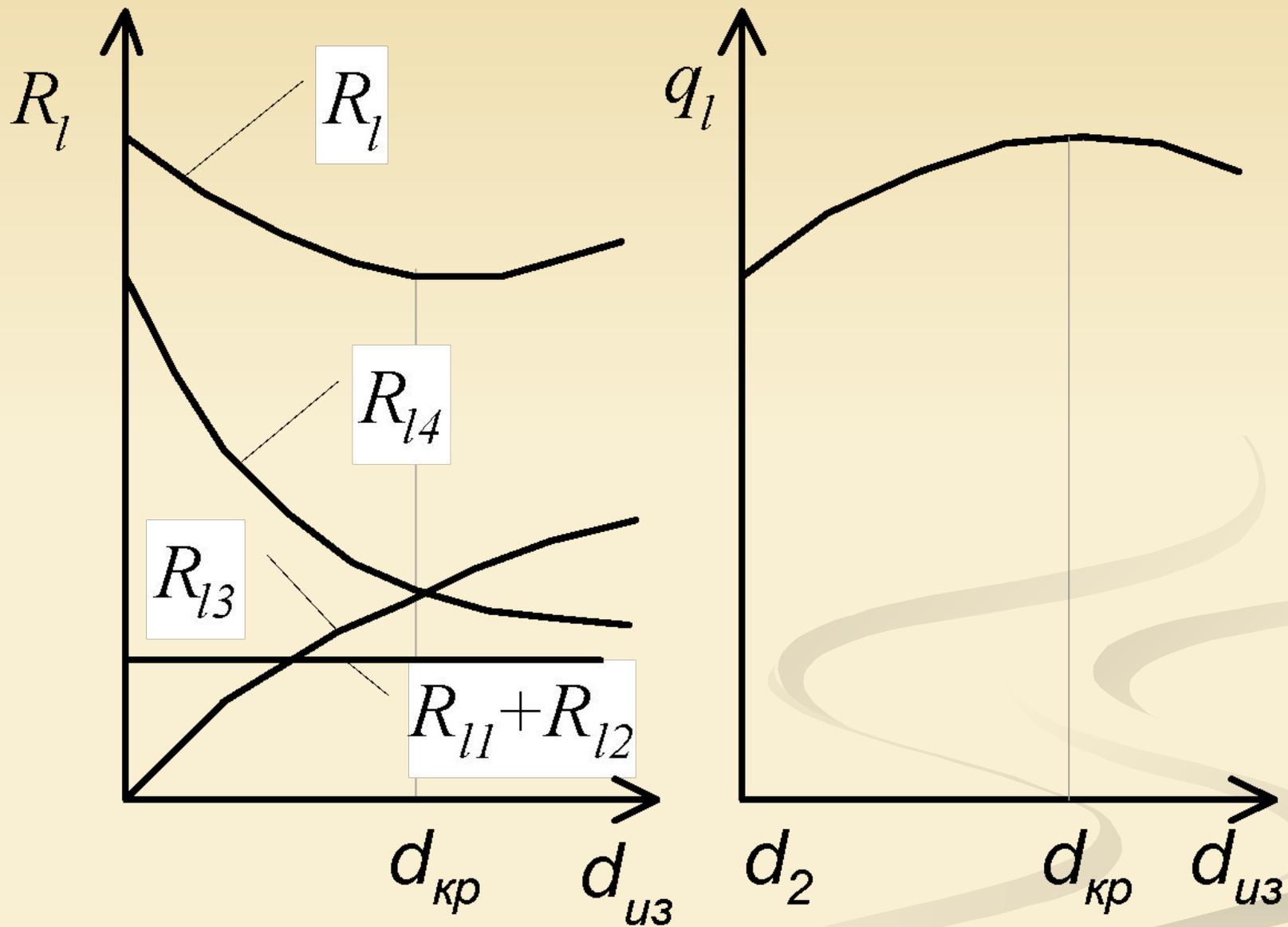
Тепловая изоляция...

Первые два слагаемых правой части уравнения не зависят от наружного диаметра изоляции d_3 , поэтому сумма этих сопротивлений на графике может быть показана прямой, параллельной оси абсцисс.

Тепловая изоляция...

Два последних слагаемых зависят от d_3 , но эта зависимость различна: если линейное термическое сопротивление самой изоляции R_{l3} с ростом толщины изоляции, т. е. с увеличением d_3 , будет повышаться, то линейное термическое сопротивление теплоотдаче на наружной поверхности изолированного трубопровода R_{l4} с увеличением d_3 будет понижаться.

Суммирование термических сопротивлений даст полное термическое сопротивление R_l .



Критический диаметр изоляции

Тепловая изоляция...

Кривая термического сопротивления имеет явно выраженный минимум при наружном диаметре изоляции d_3 , который называется критическим.

Диаметр изоляции, при котором потери теплоты максимальные (термическое сопротивление минимальное) называют **критическим диаметром тепловой изоляции.**

Тепловая изоляция...

Для определения численного значения критического диаметра изоляции исследуем уравнение на экстремум.

Возьмем первую производную от правой части уравнения по d_3

$$\frac{\partial R_1}{\partial d_3} = \frac{1}{2\lambda_{\text{из}} d_3} - \frac{1}{\alpha_2 d_3^2}$$

Тепловая изоляция...

При $d_3 = d_{\text{кр}}$ $\partial R_l / \partial d_3 = 0$.

Тогда диаметр изоляции, отвечающий экстремальной точке кривой $R_l = f(d_3)$ определится формулой

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

Тепловая изоляция...

Из формулы следует, что критический диаметр изоляции не зависит от размеров трубопровода и не имеет геометрического смысла, хотя и измеряется линейной величиной (в метрах).

Он будет тем меньше, чем меньше теплопроводность изоляции и чем больше коэффициент теплоотдачи α_2 от наружной поверхности изоляции к окружающей среде.

Тепловая изоляция...

Из рисунка видно, что если на трубопровод наружным диаметром d_2 нанести материал, для которого расчетное значение $d_{кр}$ оказалось большим, чем d_2 , то тепловые потери будут возрастать по сравнению с тепловыми потерями оголенного трубопровода, достигнут максимума при $d_3 = d_{кр}$ и только при нанесении изоляции толщиной $(d'_3 - d_2)/2$ вновь станут такими же, как и для неизолированного трубопровода. Таким образом, окажется, что этот слой изоляции был нанесен напрасно.

Тепловая изоляция...

Следовательно, для создания эффективной тепловой изоляции трубопровода необходимо, чтобы критический диаметр был меньше внешнего диаметра неизолированной трубы, т. е. $d_{кр} < d_2$.

Только при этом условии нанесение слоя изоляции любой толщины будет вызывать немедленное снижение тепловых потерь.

Тепловая изоляция...

Таким образом, для того чтобы изоляция вызвала уменьшение тепловых потерь по сравнению с неизолированным трубопроводом при данном наружном диаметре трубы d_2 и заданном коэффициенте теплоотдачи α_2 , необходимо подобрать такой теплоизоляционный материал, для которого

$$d_{\text{кр}} = \frac{2\lambda_{\text{из}}}{\alpha_2} \leq d_2$$

Тепловая изоляция...

, т.е. коэффициент теплопроводности материала должен удовлетворять условию

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

Это соотношение называют **условием рационального выбора материала для тепловой изоляции трубопроводов.**

Тепловая изоляция...

Соотношение $d_2 < d_{кр}$, при котором нанесение дополнительного слоя материала на цилиндр приводит к увеличению тепловых потерь, также используется на практике.

Именно такое «охлаждающее» действие должна оказывать, например, электрическая изоляция, наносимая на проводники, из которых формируются обмотки электромашин.

Тепловая изоляция...

В этом случае теплофизические свойства наносимого материала должны удовлетворять условию

$$\lambda_{\text{из}} \geq \frac{\alpha_2 d_2}{2}$$

Тепловая изоляция...

Все сказанное в настоящем разделе, очевидно, относится не только к трубам круглого сечения, но и к телам иной геометрической формы, у которых площади внутренней и внешней поверхностей различны.

ВЫВОДЫ

Источники дополнительных сведений