

# Лекция 5. Тепломассообменные процессы в низкотемпературной изоляции.



## Основные теплообмена (теплопередачи). Тепловая изоляция.



**Теплообмен – самопроизвольный  
необратимый**

**процесс переноса теплоты в пространстве с  
неоднородным распределением температуры**



Существуют три различных по своей природе  
основных вида теплообмена:

**теплопроводность (кондуктивный теплообмен),  
конвективный теплообмен (конвекция),  
лучистый (радиационный) теплообмен.**



## Теплопроводность

(встречаемая, как правило, только в твердых средах)

– **молекулярный** процесс переноса теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием **градиента (перепада)** температуры.

Осуществляется за счет распространения упругих волн колеблющихся атомов и молекул (в диэлектриках) или связан с перемещением свободных электронов и колебаниями атомов кристаллической решетки (в металлах).



## Конвективный теплообмен

(имеющий место в движущихся средах) – перенос теплоты, обусловленный перемещением макроскопических элементов среды (объемов жидкости или газа) в пространстве, сопровождающийся теплопроводностью.

Его наиболее распространенный случай – **теплоотдача** - конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностью ее раздела с другой средой (твердым телом, жидкостью или газом).



**Лучистый теплообмен**, осуществляемый (в отличии от теплопроводности и конвекции) при отсутствии вещественной среды и обусловленный превращением внутренней энергии вещества в **энергию электромагнитных волн**, распространением их в пространстве и поглощением энергии этих волн веществом.

**На практике** теплообмен часто происходит **всеми** тремя выше названными способами и носит название **сложного теплообмена**.



## Тепловой поток ( $Q$ ).

Количество теплоты  $\Delta Q$ , переданное в единицу времени

$\tau$ :

$$Q = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} \quad \text{или} \quad Q = \frac{dQ}{d\tau}$$

Отнесенный к единице площади поверхности тепловой поток называется плотностью теплового потока или тепловой нагрузкой поверхности нагрева.

$$q = \frac{Q}{F}$$

**Температурное поле** – совокупность значений температур  $T$  во всех точках тела (пространства) в некоторый фиксированный момент времени  $\tau$ :

стационарное (установившееся) – зависящее только от пространственных координат,  $T = f(x, y, z)$ ;

нестационарное (неустановившееся) – зависящее также и от времени,  $T = f(x, y, z, \tau)$ .

Поверхность, во всех точках которой температуры одинаковы, называют изотермической, а линии равных температур - **изотермами**.

**Градиент температур** – вектор, численно равный производной от температуры по направлению нормали к изотермической поверхности:

$$\mathit{grad} t \equiv \nabla t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{\partial t}{\partial n}$$

$$\nabla t = \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right) \cdot \vec{i} + \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right) \cdot \vec{j} + \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right) \cdot \vec{k},$$

# Теплопроводность

**Основной закон теплопроводности (закон Фурье),** установленный опытным путем, формулируется следующим образом: плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t = -\lambda \cdot \nabla t$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м К), численно равный тепловому потоку проходящему через единицу поверхности (1 м<sup>2</sup>) при градиенте температур, равном

$$\text{grad } t = 1 \text{ K} / \text{м}$$



# Дифференциальное уравнение теплопроводности и условия однозначности

$$\rho \cdot c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla (\lambda \cdot \nabla t) + q_v$$

$q_v$  (Вт/м<sup>3</sup>) - мощность внутренних источников теплоты

При  $\lambda = \text{const}$ :

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

$a = \frac{\lambda}{c \rho}$ , м<sup>2</sup>/с – коэффициент температуропроводности

# Условия однозначности (единственности):

- ✓ геометрические, согласно которым задаются форма и размеры твердого тела;
- ✓ физических, задаваемых физическими свойствами тела или их зависимостями от температуры;
- ✓ начальных, устанавливающих распределение температуры в теле в начальный момент времени – (временное краевое условие);
- ✓ граничные.

1.  $t_c = t(x_c, y_c, z_c, \tau);$

2.  $q_c = f(\tau);$

3.  $q_c = \alpha \cdot [t_c(\tau) - t_{ж}(\tau)];$

4. 
$$\begin{cases} -\lambda_1 \cdot \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right) \Big|_{x_{i-0}} = -\lambda_2 \cdot \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right) \Big|_{x_{i-0}} \\ t \Big|_{x_{i-0}} = t \Big|_{x_{i-0}} \end{cases}$$

# Теплопроводность при стационарном режиме

## Плоская стенка

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

$$t = t_{C1} + \frac{t_{C2} - t_{C1}}{\delta} x$$

$$\Delta t = q \cdot R$$

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \delta_i}{\lambda_{\text{экв. (эфф.)}}} = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i}{\lambda_i}$$

$$\frac{1}{\lambda_{\text{экв. (эфф.)}}} = \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{\lambda_i}, \quad r_i - \text{объемная доля}$$

## Цилиндрическая стенка

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0$$

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \ln \frac{d}{d_1}$$

$$Q = \frac{\pi l (t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{N+1}}}$$

$$q_l = \frac{\pi (t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{N+1}}}$$

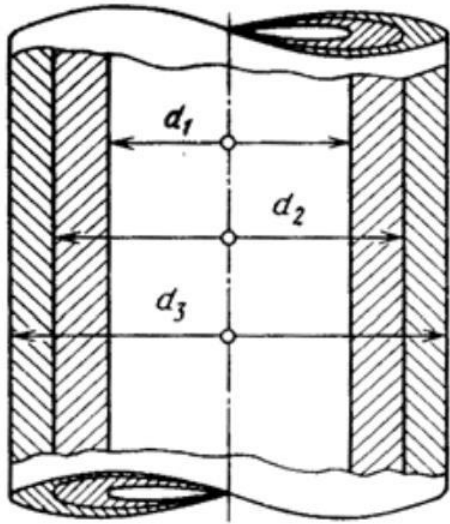
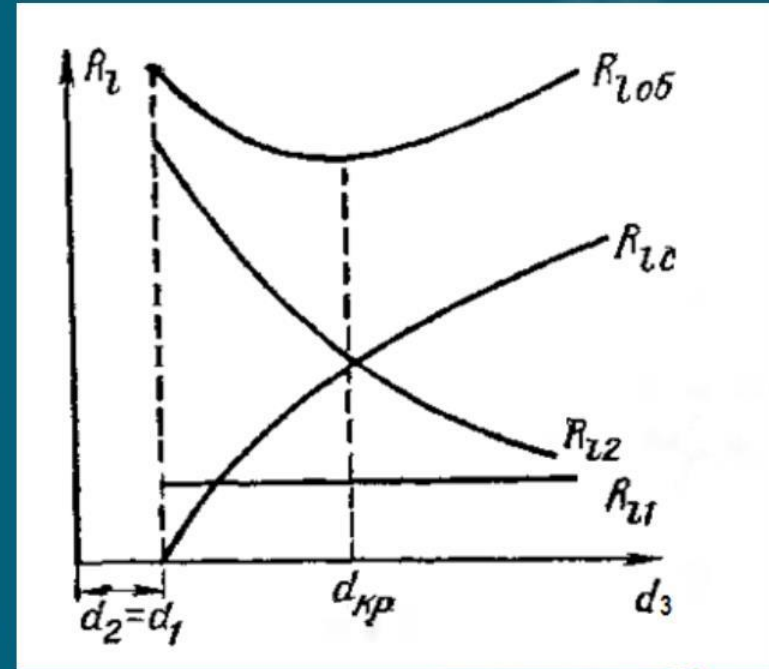


Схема цилиндра  
с тепловой изоляцией

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}$$

$$\frac{\partial(R_l)}{\partial(d_3)} = 0 + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \frac{1}{d_3} + \frac{1}{\alpha_2} (-1) \frac{1}{(d_3)^2}$$

$$\frac{\partial(R_l)}{\partial(d_{кр})} = 0 \Rightarrow \frac{1}{2 \cdot \lambda_{из}} - \frac{1}{\alpha_2} \frac{1}{d_{кр}} = 0 \Rightarrow d_{кр} = \frac{2 \cdot \lambda_{из}}{\alpha_2}$$



$$d_2 \geq d_{кр} \Rightarrow \lambda_{из} \leq \frac{\alpha_2 d_2}{2}$$

# Вспученные пенопластовые изоляции

Теплопроводность пенопластовых изоляций зависит от рода газа, используемого при изготовлении изоляции, от внутреннего радиационного теплообмена и теплопроводности твердого тела.

Пена	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, мВт/(м×К)
Полиуретан	11	33
Полистирол	39	33
	46	26
Резина	80	36
Кремнезем	160	55
Стекло	140	35

# Газонаполненные изоляции

Основным свойством - уменьшение или устранение конвекции вследствие малого размера пор внутри материала.

В мелкозернистых порошках расстояние между частицами может оказаться меньше, чем средняя длина свободного пробега молекул в изоляции, и механизм переноса теплопроводностью в газе заменяется на перенос при свободномолекулярном течении. В этом случае теплопроводность газа уменьшается и кажущаяся теплопроводность материала становится соответственно меньше, чем для порошков с крупными частицами.

Недостатком газонаполненных волокнистых материалов является то, что влага и воздух могут проникать через материал к холодной поверхности.

Изоляция	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, мВт/(м×К)
Перлит	50	26
	210	44
Аэрогель	80	19
Вермикулит	120	52
Стекловолокно	110	25
Минеральная вата	160	35

# Вакуумная изоляция

$$Q = Q_{\text{л}} + Q_a$$

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_e \varphi_{12} \sigma F_1 (T_2^4 - T_1^4)$$

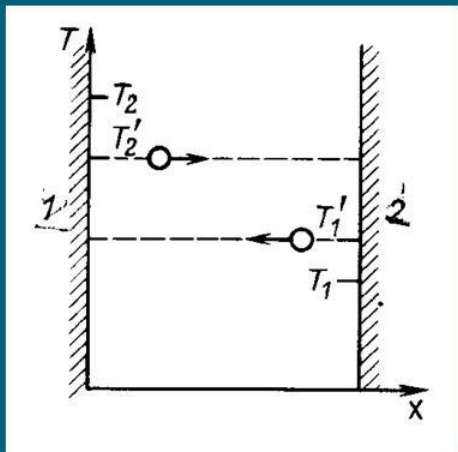
Поверхность одна в другой

$$\frac{1}{\varepsilon_e} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)$$

Поверхности плоские с  $N$  экранами

$$\frac{1}{\varepsilon_e} = \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_s} - 1 \right) + (N - 1) \left( \frac{2}{\varepsilon_s} - 1 \right) + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_s} - 1 \right)$$





$$Q_a = GpF(T_2 - T_1)$$

$$G = \varepsilon_a \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \sqrt{\frac{g_c R}{8\pi T}}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_a} = \frac{1}{a_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{a_2} - 1 \right)$$

$$a_1 = (T_2' - T_1') / (T_2' - T_1) - \text{холодная}$$

$$a_2 = (T_2' - T_1') / (T_2 - T_1') - \text{теплая}$$

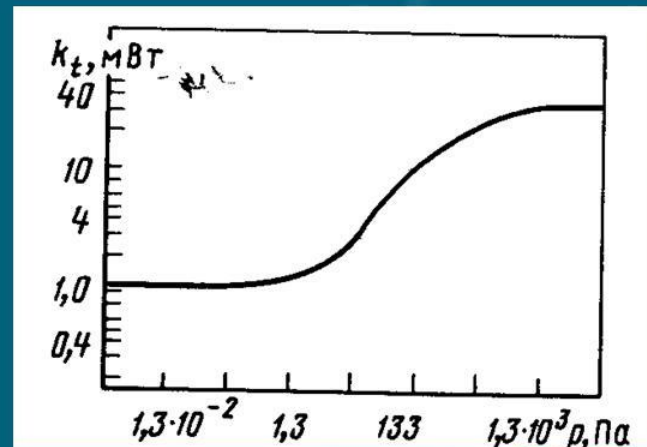
$$l_g = \frac{\mu}{p} \sqrt{\frac{\pi TR}{2g_c}} - \text{длина свободного пробега,}$$

$\mu$  – динамическая вязкость,

$R$  – газовая постоянная.

# Вакуумно-порошковая и вакуумно-волокнистая ИЗОЛЯЦИИ

300-78 К, давление ниже 0.13 Па



Изоляция	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, мВт/(м×К)
Рафинированный перлит	180	0.95
Нерафинированный перлит	64	1.90
Аэрогель кремния	80	1.60
Силикат кальция	210	0.59
Ламповая сажа	200	1.20
Фибростекло	50	1.70

# Отражающие порошковые изоляции

Так как большая часть общего теплового потока через вакуумно-порошковые изоляции приходится на излучение, особенно если теплообмен происходит между поверхностями с комнатной и криотемпературами, следует ожидать, что повышение качества изоляции возможно при уменьшении каким-либо способом теплопереноса излучением. Это достигается добавлением вакуумированные порошки алюминиевой или медной пудры - Применяя оптимальное количество пудры (40-50% по массе), теплопроводность вакуумированных порошков можно уменьшить в 5 раз. С точки зрения безопасности медная пудра предпочтительнее алюминиевой, потому что алюминий имеет большую теплоту сгорания при соединении с кислородом. Медные отражающие порошки обеспечивают полную безопасность. Один из недостатков отражающих порошков заключается в том, что при вибрациях может иметь место «слеживаемость» металлической пудры. При скоплении порошка в одном месте возникает «тепловое короткое замыкание» и теплопроводность изоляции возрастает.

Изоляция	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, мВт/(м×К)
50/50 кг/кг Медь-сантосел	180	0.33
46/60 кг/кг Алюминий-сантосел	160	0.35
50/50 кг/кг Бронза-сантосел	179	0.58
Кремнезем-углерод	80	0.48

# Многослойная изоляция

$$\lambda_{\text{эфф}} = \frac{\Delta x}{N_{\text{слоев}}} \left[ \lambda_{\text{сетки}} + \sigma \varepsilon_{\text{эфф}} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) / (2 - \varepsilon_{\text{эфф}}) \right]$$

Изоляция (мм)+(мм)	Плотность слоя, слой/см	Теплопроводность, мкВт/(м×К)
Алюминиевая фольга (0.006)+ стеклобумага (0.15)	20	37
Алюминиевая фольга (0.006)+ сетка искус. шелка (2)	10	78
Алюминиевая фольга (0.006)+ нейлоновая сетка (2)	11	34
Гофрированная пленка алюминизированного майлара (0.006)	35	42
Алюминиевая фольга (0.0087)+ стеклобумага с нитями из углерода (0.15)	30	14

Вспученные пенопласты

Низкая стоимость. Легко изолировать поверхности сложной формы  
Не требуется жесткий вакуумированный кожух. Высокая прочность.

Большая термическая усадка.  
Теплопроводность может меняться со временем.



Газонаполненные порошки и волокнистые материалы.

Низкая стоимость Легко изолировать поверхности сложной формы. Не горят.

Требуется защита от проникновения паров воды. Порошок может уплотниться\* и теплопроводность увеличиться.



Вакуумная

Малые потери на захлаживание. Низкий тепловой поток при малом зазоре между внутренним и наружным сосудами

Необходимо постоянно поддерживать высокий вакуум. Граничные поверхности должны иметь высокую отражательную способность.



Вакуумированные порошки и волокнистые материалы

Требуется менее глубокий вакуум, чем для многослойной изоляции Легко изолировать поверхности сложной формы. Вакуумируются относительно легко

Может уплотняться при вибрациях и термоциклировании При вакуумировании требуются специальные фильтры. Необходима защита от соприкосновения с влажным воздухом



Отражающие порошки

Лучшие характеристики, чем у обычных вакуумированных порошков Легко изолировать поверхности сложной формы. Требуется менее глубокий вакуум, чем для многослойной или вакуумной изоляции

Более высокая стоимость, чем для вакуумированных порошков. Имеется опасность взрыва алюминиевого порошка в атмосфере кислорода Проблемы осаждения металлической пудры.



Многослойная

Лучшие характеристики по сравнению с другими типами изоляций Малый вес. Малые потери на захлаживание по сравнению с порошковыми изоляциями Более высокая стабильность по сравнению с порошками.

Высокая стоимость на единицу объема Трудно изолировать поверхности сложной формы. Проблемы продольной теплопроводности. Требуется более глубокий вакуум, чем для порошковых изоляций.

