

Тепломассообмен

ЛЕКЦИИ	36 часов
ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ	18 часов
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	27 часов
АУДИТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ	81 час
САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА	90 часов
ИТОГО	171 часов

Лектор –Борисов Борис Владимирович, проф. каф. ТПТ ЭНИН, д. ф.-м. н.

4 корпус ТПУ комната 49

Рабочий телефон : 564-010

Email: bvborisov@tpu.ru

Основная литература:

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат.- 1981- 416с.
2. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 1980. –288с.
3. Практикум по теплопередаче.: Учеб. пособие для ВУЗов/ А.П. Солодов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.
4. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: Учебное пособие для ВУЗов/ Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев – 3-е изд., перераб. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 550 с., ил.
5. Цветков Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену: Учебное пособие /Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. – 2-ое изд., испр. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008, - 196 с., ил.
6. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
7. Практикум по теплопередаче /Под ред. А.П. Солодова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.
8. Галин Н.М., Кириллов П.Л. Тепломассообмен (в ядерной энергетике). – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 376 с.
9. Тепло-и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник /Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

Тема 1 (2 час, лекция 1)

Лекция 1

Основные понятия и определения теории тепломассообмена.

Предмет и задачи теории тепломассообмена. Основные процессы передачи теплоты и массы. Основные понятия и определения. Виды переноса теплоты: **теплопроводность, конвекция, излучение**. Теплоотдача. Теплопередача. Макроскопический характер учения о теплоте. Современные проблемы тепломассообмена. Вклад отечественных ученых в развитие тепломассообмена.

Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Механизм передачи теплоты в металлах, диэлектриках, жидкостях и газах.

Основные понятия и определения **конвективного теплообмена**. Закон Ньютона – Рихмана. Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи.

Теплообмен излучением. Понятие о сложном теплообмене.

Теория теплопроводности.

Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности для процессов теплопроводности. Коэффициент температуропроводности.



Теплообмен (*heat exchange*) – это самопроизвольный необратимый перенос энергии в форме теплоты, который происходит между телами с разными температурами. Движущей силой любого процесса теплообмена является разность (градиент) температур, при наличии которой теплота самопроизвольно переходит от более нагретого к менее нагретому телу (второй закон термодинамики).

Тела, участвующие в теплообмене, называются **теплоносителями** (*heat carriers*).



Различают **три вида (способа, механизма)** теплообмена:

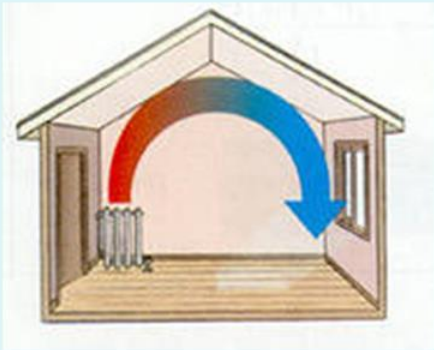
- Теплопроводность - **кондукция**,
- Конвективный теплообмен - **конвекция**,
- Лучистый (радиационный) теплообмен
– **теплообмен излучением**



Теплопроводность (*heat conduction*) – это перенос внутренней энергии в форме теплоты, который осуществляется в процессе передачи энергии от частиц (молекул, атомов, ионов, электронов), обладающих большей энергией в условиях их хаотического движения, сопровождающегося взаимными столкновениями.

Теплопроводность более отчетливо наблюдается в твердых средах. Поскольку 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).

Конвекция (*convection*) – это перенос теплоты за счет переноса энергии вместе с массой и макроперемешивания, создаваемого в объеме жидкости за счет движения.



Свободная (естественная) *конвекция* (*free convection*) возникает самопроизвольно под влиянием объемных, (массовых) сил (например, сила Архимеда), когда в системе по тем или иным причинам создаются макрофлуктуации (отклонения от среднего значения) плотности, заряда и пр.

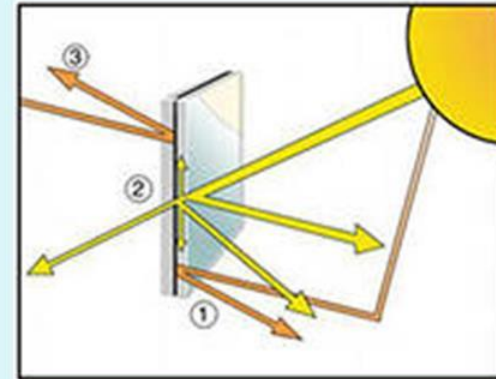
Нагрев части воды в чайнике и перемешивание.



Вынужденная конвекция (*induced convection*) обеспечивается поверхностными силами (перепад давления).

Например, в результате действия специальных устройств, создающими принудительное движение жидкости или газа (вентиляторы, насосы и т.д.).





Тепловое излучение (*heat radiation*) – это электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет энергии теплового движения атомов (молекул) излучающего тела. При столкновении атомов друг с другом часть их кинетической энергии превращается в энергию возбуждения атомов, которые затем излучают электромагнитную волну.

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

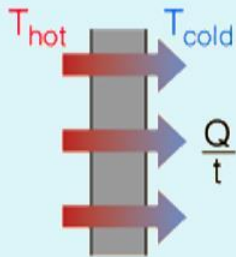
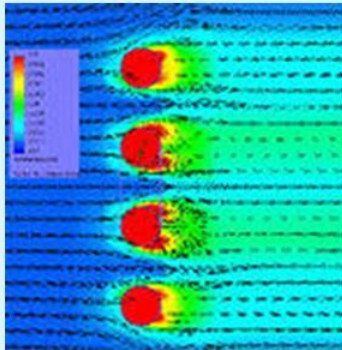
На практике теплообмен часто происходит всеми тремя выше названными способами и носит название **сложного теплообмена**.



Теплоотдача (*heat loss*) – это теплообмен между поверхностью твердого тела и соприкасающейся с ней жидкой или газообразной средой (теплоносителем).

В теплоотдаче могут участвовать **все три вида теплообмена** – теплопроводность, конвективный теплообмен и тепловое излучение.

Различают теплоотдачу при **свободном и вынужденном** движении теплоносителя, а также при изменении его агрегатного состояния.



Теплопередача (*heat transfer*) – это теплообмен между двумя жидкими или газообразными теплоносителями через разделяющую их твердую стенку.

Теплопередача включает в себя **теплоотдачу** между стенкой и каждым теплоносителем, а также **теплопроводность** через стенку.



Количество теплоты

$$\Delta Q, \text{ Дж}$$

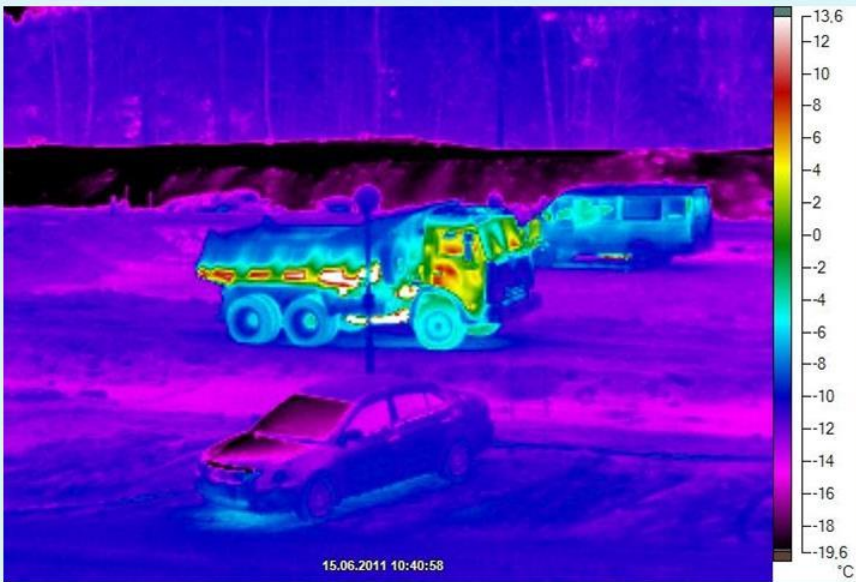
Тепловой поток – количество теплоты, переданное в единицу времени через *изотермическую* поверхность.

$$Q = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau}, \text{ Вт}$$



Плотность теплового потока – количество теплоты, переданное в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau \cdot F}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$



При нагреве тела температура в различных его в различных точках изменяется во времени и теплота распространяется от точек с более высокой температурой к точкам с более низкой.

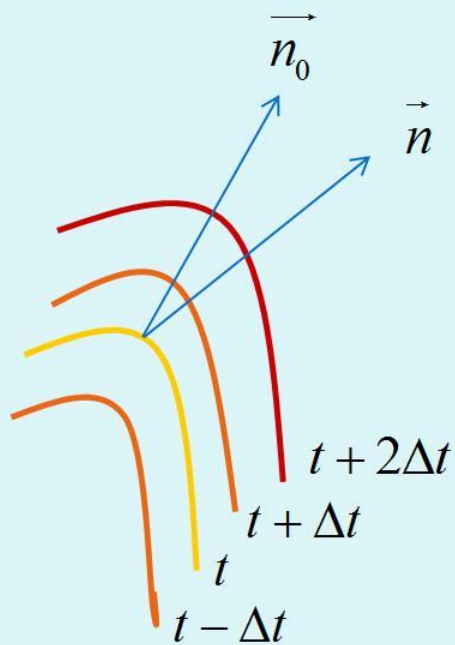
Из этого следует, что процесс передачи теплоты теплопроводностью в твердом теле сопровождается изменением температуры как во времени, так и в пространстве, т.е. температура

Совокупность значений температур t во всех точках тела (пространства) в некоторый фиксированный момент времени - температурное поле $t = t(x, y, z, \tau)$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \quad - \text{стационарное}$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \neq 0 \quad - \text{нестационарное}$$

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



$$\text{grad}(t) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} \vec{n}_0 \equiv \nabla t$$

$$\nabla t = \frac{\lim_{V \rightarrow 0} \left(\oint_A T \overline{dA} \right)}{V}$$

где ∇ – символический вектор (оператор Гамильтона)

$$\text{grad}(t) = \vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z} \equiv \nabla t$$

Гипотеза (Закон) Фурье – основной закон теплопроводности.

Установлен опытным путем: плотность теплового потока теплопроводностью равна градиенту температуры взятому с обратным знаком и умноженному на коэффициент теплопроводности

$$\delta^2 Q = -\lambda \text{grad}(t) dF d\tau = -\lambda dF d\tau \frac{dt}{dn}$$

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

Жан Батист Жозеф Фурье (фр. Jean Baptiste Joseph Fourier; 21 марта 1768, Осер, Франция — 16 мая 1830, Париж), французский математик и физик. Ряды Фурье, В 1823 независимо от Эрстеда открыл термоэлектрический эффект, показал, что он обладает свойством суперпозиции, создал термоэлектрический элемент. 1822 «Аналитическая теория тепла» («Théorie analytique de la chaleur»), которую лорд Кельвин назвал «Великой математической поэмой». Его имя внесено в список величайших учёных Франции, помещённый на первом этаже Эйфелевой башни.



$$\lambda = \frac{\left| \frac{q}{dn} \right|}{\left| \frac{dT}{dn} \right|} = \frac{|q|}{|\text{grad}(t)|}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м К), численно равный тепловому потоку проходящему через единицу поверхности (1 м²) при градиенте температур, равном единице.

$\lambda > 1$ – проводники

$\lambda < 1$ – изоляторы

$$\text{Часто } - \lambda = \lambda_0 [1 + b(t - t_0)]$$

Металлы

	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Сталь	- 16÷50
Чугун, латунь	- 60÷90
Алюминий	- 204
Медь	- 384
Серебро	- 458

У чистых с ростом
Т - падает

Жидкости

$$\lambda = A \frac{c_p \rho^{4/3}}{\mu^{1/3}}$$

A – const

Вода - ~0.6 $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

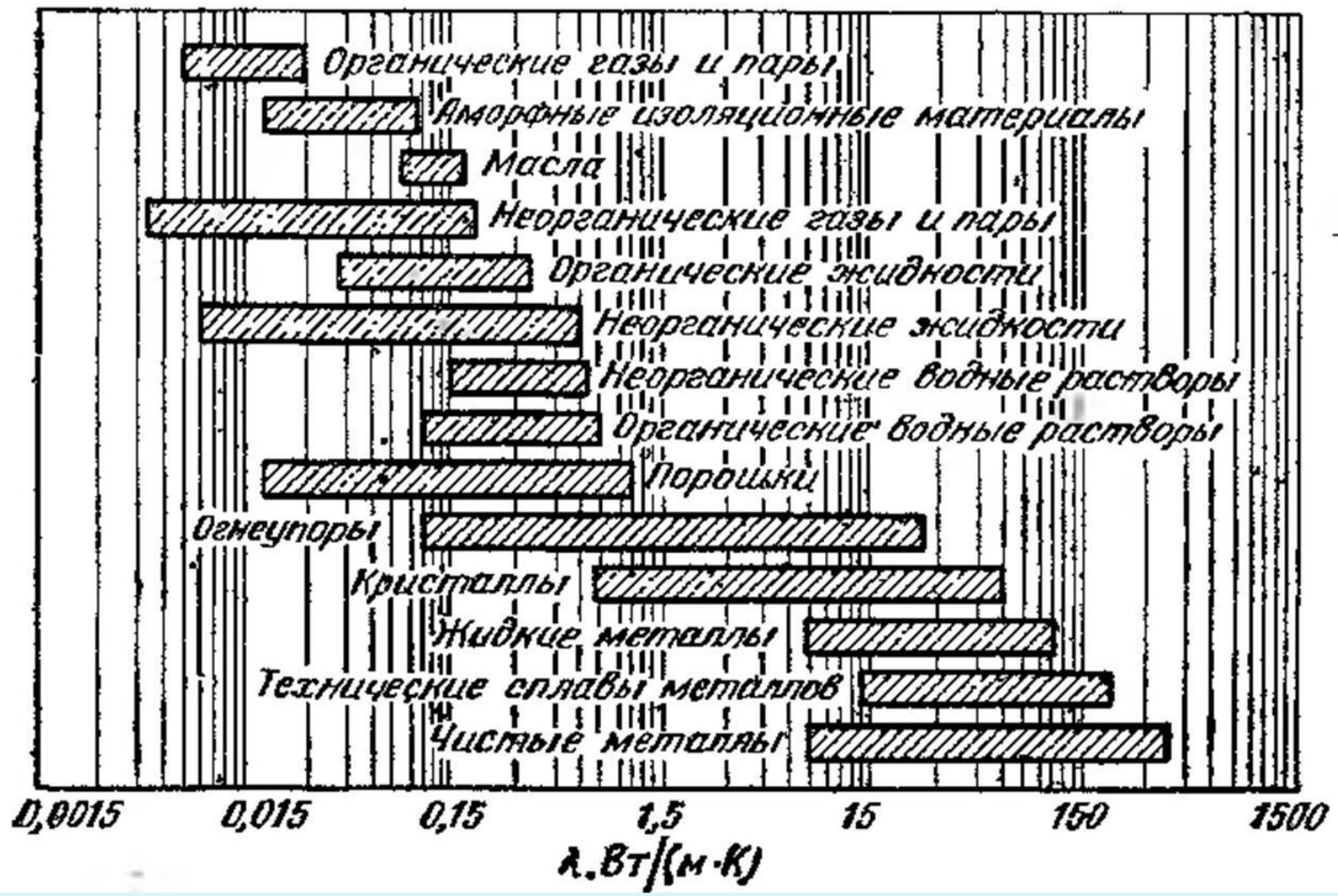
С ростом
Т – чаще падает.
Исключение:
вода, глицерин

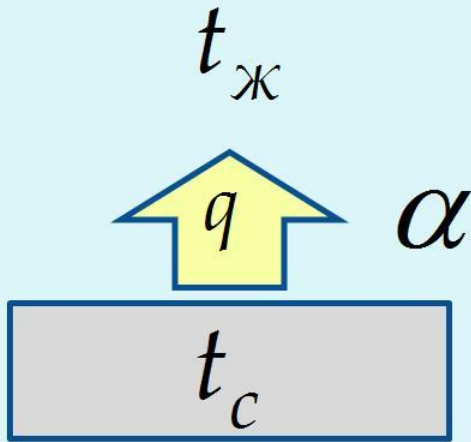
Газы

$$\lambda = \frac{\bar{w} c_v l \rho}{3} = \sqrt{\frac{3R_\mu T}{\mu}} \frac{c_v l \rho}{3}$$

l – свободный пробег

Воздух - ~0.03 $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$





Основной закон теплоотдачи.
Закон Ньютона Рихмана

$$q = \alpha(t_c - t_{\text{ж}})$$

$$\alpha = \frac{|q|}{|t_c - t_{\text{ж}}|}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}} \text{ — коэффициент теплоотдачи}$$

Численно равный тепловому потоку проходящему через единицу поверхности (1 м^2) при разнице температур, равной единице.

Лучистый теплообмен:

Любое тело с $T > 0$ – излучает. Уменьшение или увеличение температуры в результате этого взаимного обмена потоками теплоты излучения.

Абсолютно чёрное тело — физическая идеализация, применяемая в термодинамике, тело, поглощающее всё падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах и ничего не отражающее. Наиболее чёрные реальные вещества, например, сажа, поглощают до 99 % падающего излучения (то есть имеют альбедо, равное 0,01) в видимом диапазоне длин волн, однако инфракрасное излучение поглощается ими значительно хуже. Среди тел Солнечной системы свойствами абсолютно чёрного тела в наибольшей степени обладает Солнце. Термин был введён Густавом Кирхгофом в 1862 году.

$$q_{\lambda 0} = \sigma_0 T^4$$

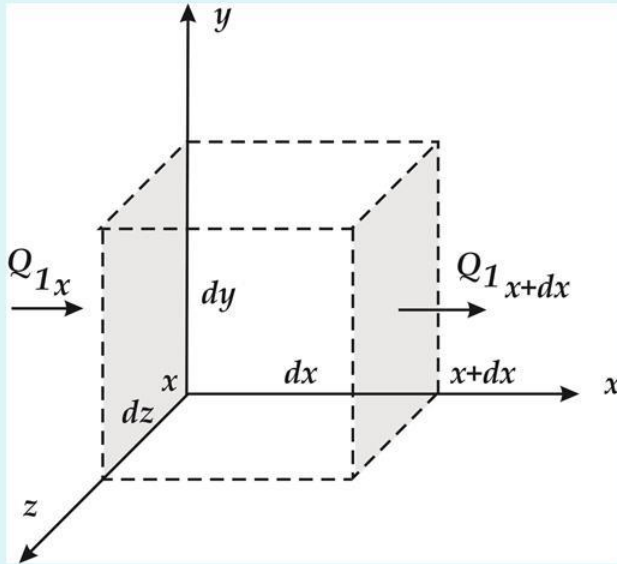
$$\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$$

$$q_{\lambda} = \varepsilon \sigma_0 T^4 = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

$$q_{\lambda 12} = \overline{\varepsilon}_{12} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$



Дифференциальное уравнение теплопроводности



$$\delta Q = dH + \delta L \Rightarrow \delta Q = dH$$

$$dH = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot d\tau dV = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot d\tau \cdot dx dy dz$$

$$\delta Q = \delta Q_1 + \delta Q_2$$

$$\delta Q_2 = q_v dV \cdot d\tau = q_v dx dy dz \cdot d\tau$$

$$q_v = \frac{\Delta Q_v}{V \cdot \Delta \tau}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \text{ — мощность внутренних}$$

ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ

$$\delta Q_1 = \delta Q_{1_x} + \delta Q_{1_y} + \delta Q_{1_z}$$

$$\delta Q_{1_x} = (Q_{1_x} - Q_{1_{x+dx}}) d\tau = (q_{1_x} dy dz - q_{1_{x+dx}} dy dz) d\tau =$$

$$= \left| q_{1_{x+dx}} = q_{1_x} + \frac{\partial q_{1_x}}{\partial x} dx \right| = - \frac{\partial q_{1_x}}{\partial x} dx dy dz d\tau = - \frac{\partial q_{1_x}}{\partial x} dV d\tau$$

$$\delta Q_1 = - \left(\frac{\partial q_{1_x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{1_y}}{\partial x} + \frac{\partial q_{1_z}}{\partial x} \right) dV d\tau$$

$$\partial t = \partial T \quad dH = \rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot d\tau dV$$

$$\delta Q = \delta Q_1 + \delta Q_2$$

$$\delta Q_1 = - \left(\frac{\partial q_{1x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{1y}}{\partial y} + \frac{\partial q_{1z}}{\partial z} \right) dV d\tau$$

$$q_{1x} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}$$

$$q_{1y} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y}$$

$$q_{1z} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z}$$

$$\delta Q_2 = q_v dV \cdot d\tau$$

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial t}{\partial z} + q_v$$

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div} \lambda \operatorname{grad}(t) + q_v$$

$\lambda = \text{const} :$

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

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c_p}, \quad \frac{\text{м}^2}{\text{с}} - \text{коэффициент температуропроводности}$$

Коэффициент теплопроводности существенен для нестационарных процессов. Он характеризует скорость изменения температуры.

САМОСТОЯТЕЛЬНО:

КАК ЗАПИСЫВАЕТСЯ ОПЕРАТОРЫ

$$\operatorname{div} \lambda \operatorname{grad}(T)$$

$$a \cdot \operatorname{div} \operatorname{grad}(T)$$

**В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ
И
СФЕРИЧЕСКОЙ
СИСТЕМАХ КООРДИНАТ**

условия однозначности (единственности) определяют все частные случаи рассматриваемого процесса:

- геометрических, согласно которым задаются форма и размеры твердого тела
- физических, задаваемых физическими свойствами тела c, ρ, λ, q_v или их зависимостями от температуры
- начальных, устанавливающих распределение температуры в теле в начальный момент времени – (временное краевое условие)
- граничные условия:

Их совокупность – краевые условия

граничным условием первого рода $t_{\Gamma} = t(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma}, \tau)$

граничным условием второго рода $-\lambda \frac{dt}{dn} \Big|_{\Gamma} = q(\tau)$

граничным условием третьего рода $\pm \lambda \frac{dt}{dn} \Big|_{\Gamma} = \alpha(t_c - t_{жс})$

граничным условием четвертого рода
(условия сопряжения)

$$-\lambda \frac{dt}{dn} \Big|_{\Gamma^-} = -\lambda \frac{dt}{dn} \Big|_{\Gamma^+}$$
$$t \Big|_{\Gamma^-} = t \Big|_{\Gamma^+}$$