

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ТЕПЛООБМЕНА

Литература

Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен

Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача

Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи

- Термодинамическая система может обмениваться энергией с окружающей средой посредством совершения работы, теплообмена и массообмена.
- Термодинамика имеет дело с равновесными состояниями и ничего не может сказать ни о скорости процесса, ни о времени его протекания.
- Теплообмен — процесс, протекающий во времени, поэтому основные соотношения теории теплообмена содержат время.
- **Теплообмен (теплопередача) — учение о самопроизвольных необратимых процессах распространения теплоты в пространстве.**

Три способа переноса теплоты

- теплопроводность,
- конвекция,
- тепловое излучение.

Теплопроводность

- **Теплопроводность** — молекулярный перенос теплоты в телах (и между ними), обусловленный неоднородностью температуры в рассматриваемом пространстве. Явление теплопроводности заключается в том, что кинетическая энергия атомов и молекул, которая определяет температуру тела, передаётся другому телу при их взаимодействии или передаётся из более нагретых областей тела к менее нагретым областям.

Конвекция

- Под **конвекцией** понимают процесс переноса энергии в форме теплоты при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды. Конвекция возможна только в текучей среде.

Тепловое излучение

- **Тепловое излучение** — электромагнитное излучение с непрерывным спектром, испускаемое нагретыми телами за счёт их тепловой энергии. Примером теплового излучения является свет от лампы накаливания.

- В природе и технике элементарные процессы распространения теплоты (теплопроводность, конвекция и тепловое излучение) часто происходят совместно
- Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место лишь в твердых телах.
- Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью. Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называется **конвективным теплообменом**.
- Процессы теплопроводности и конвективного теплообмена могут сопровождаться теплообменом излучением. Теплообмен, обусловленный совместным переносом теплоты излучением и теплопроводностью, называется **радиационно-кондуктивным теплообменом**.

Теплопроводность (кондуктивный теплообмен)

- Если в некоторой среде в стационарных условиях существует градиент температур, то для обозначения переноса энергии используется термин теплопроводность (кондуктивный теплообмен). Физический механизм передачи энергии — взаимодействие частиц, обладающих разным запасом энергии (разной температурой), в результате которого их энергии выравниваются.

Закон Фурье

количество теплоты dQ_τ , Дж, проходящее через элемент изотермической поверхности dF за промежуток времени $d\tau$, пропорционально градиенту температур dT/dx :

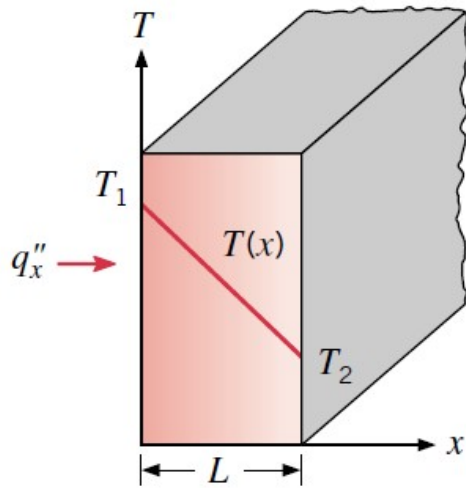
$$dQ_\tau = -\lambda \frac{dT}{dx} dF d\tau$$

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К), свойство вещества

плотность теплового потока q_x

$$q_x = \frac{dQ_\tau}{dF d\tau} = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

В стационарных условиях, в однородной среде, с одномерным температурным полем



$$dT = -\frac{q_x}{\lambda} dx \quad \text{Решение: } T = -\frac{q_x}{\lambda} x + C$$

Постоянная интегрирования C определяется из граничных условий:

$$\text{при } x = 0, T = T_1 = C,$$

$$\text{при } x = L, T = T_2,$$

$$T_2 = -\frac{q_x}{\lambda} L + T_1$$

$$q_x = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{L} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} = \lambda \frac{\Delta T}{L}$$

Тепловой поток - скорость передачи энергии путем теплообмена, Вт

$$\dot{Q}_x = \frac{dQ_\tau}{d\tau} = -\lambda \frac{dT}{dx} = q_x F$$

Пример

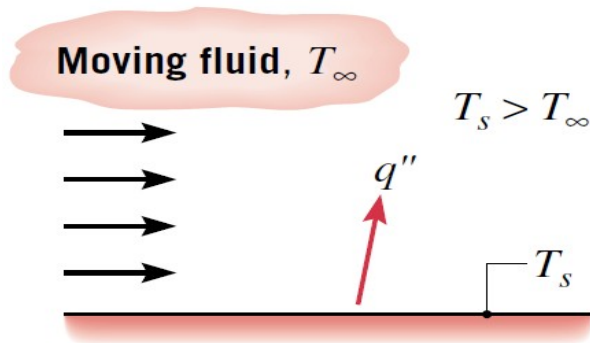
Пример. Стена печи сложена из кирпича толщиной 15 см, коэффициент теплопроводности $\lambda = 1.7$ Вт/(м*К). При работе печи в стационарных условиях температура на внутренней стенке $T_1 = 1400$ К, на внешней $T_2 = 1150$ К. Определить тепловой поток через участок стены размером 0.5*1.2 м.

Решение

$$q_x = \lambda \frac{\Delta T}{L} = \frac{1.7 * 250}{0.15} = 2833 \frac{Вт}{м^2}$$

$$\dot{Q}_x = q_x F = 1.2 * 0.5 * 2833 = 1700 Вт$$

Конвекция

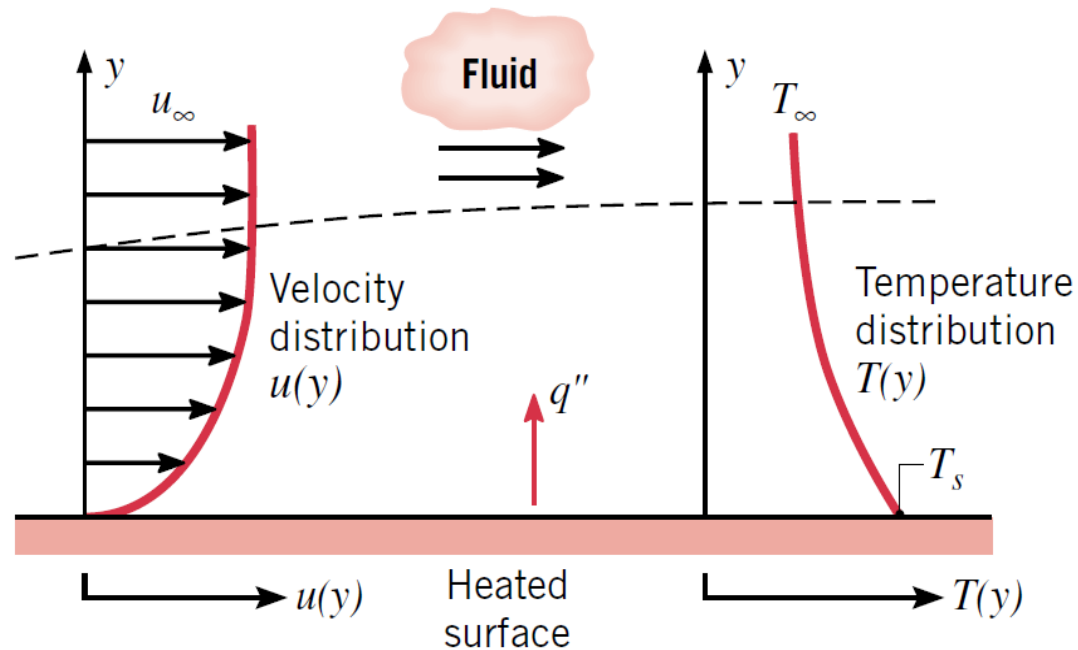


Convection from a surface to a moving fluid

Механизм конвекции состоит из двух частей:

- случайное молекулярное движение (теплопроводность);
- микроскопическое движение среды (жидкости или газа).

При наличии градиента температур происходит перенос тепловой энергии от стенки к потоку (или в обратную сторону, от потока к стенке).



При расчетах конвективного теплообмена используется эмпирический закон Ньютона-Рихмана:

$$d \dot{Q}_c = \alpha (T_s - T_\infty) dF$$

α – коэффициент теплоотдачи

Различают свободную и вынужденную конвекцию.

В первом случае (*свободная конвекция*) движение в рассматриваемом объеме возникает за счет неоднородности в нем массовых сил. Если жидкость с неоднородным распределением температуры (а следовательно и плотности) находится в поле земного тяготения, то может возникнуть свободное гравитационное движение.

Вынужденное движение рассматриваемого объёма происходит под действием внешних поверхностных сил, приложенных на его границах, за счет работы насоса, вентилятора, ветра.

В общем случае вынужденное движение может сопровождаться свободным.

$$\dot{Q}_c = \alpha (T_s - T_\infty) F$$

Радиационный (лучистый) теплообмен

- Любая нагретая поверхность излучает энергию в форме электромагнитных волн. Радиационный теплообмен не требует наличия промежуточной среды и возможен в вакууме.
- Тепловому излучению соответствуют электромагнитные волны в диапазоне длин волн 0.6 мкм-0.8 мм.

Тепловое излучение свойственно всем телам. Каждое из них излучает энергию в окружающее пространство. При попадании на другие тела эта энергия частью поглощается, частью отражается, частью проходит сквозь тело.

Та часть лучистой энергии, которая поглощается телом, снова превращается в тепловую. Часть энергии, которая отражается, попадает на другие (окружающие) тела. То же самое происходит с той частью энергии, которая проходит сквозь тело. Таким образом, после ряда поглощений энергия излучения полностью распределяется между окружающими телами. Каждое тело не только непрерывно излучает, но и непрерывно поглощает лучистую энергию.

Величина энергии, излучаемой абсолютно черным телом (максимальная величина) определяется законом Стефана-Больцмана:

$$E = \sigma T_e^4, \text{ Вт/м}^2$$

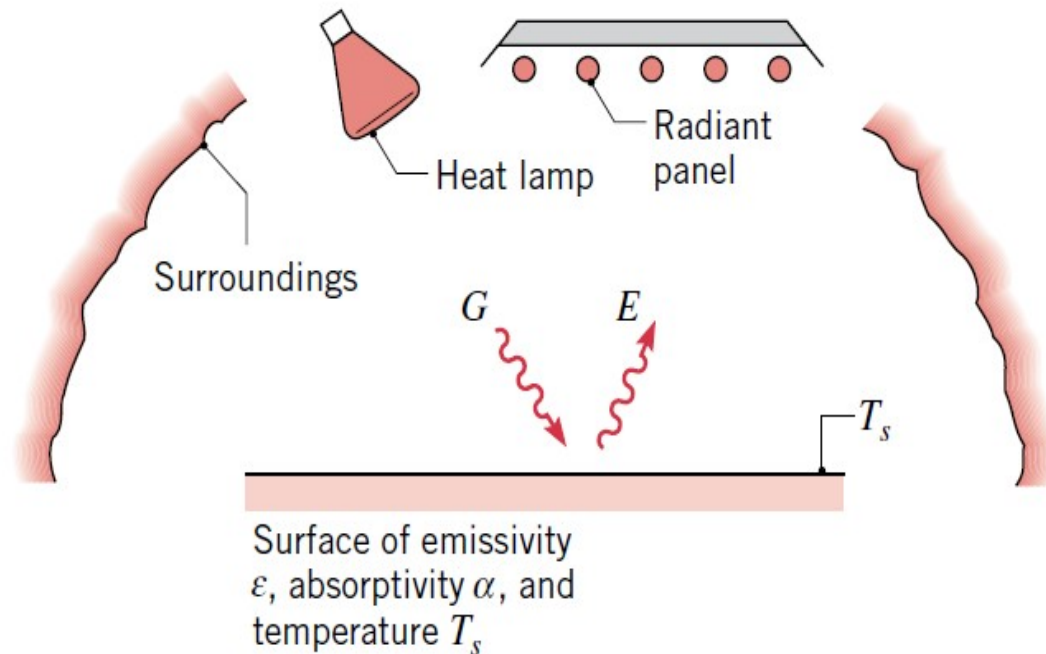
T_e – температура излучающей поверхности,
 $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²*К⁴) — постоянная Стефана-Больцмана.

Излучение реально тела (вещества) меньше излучения абсолютно черного тела и составляет величину

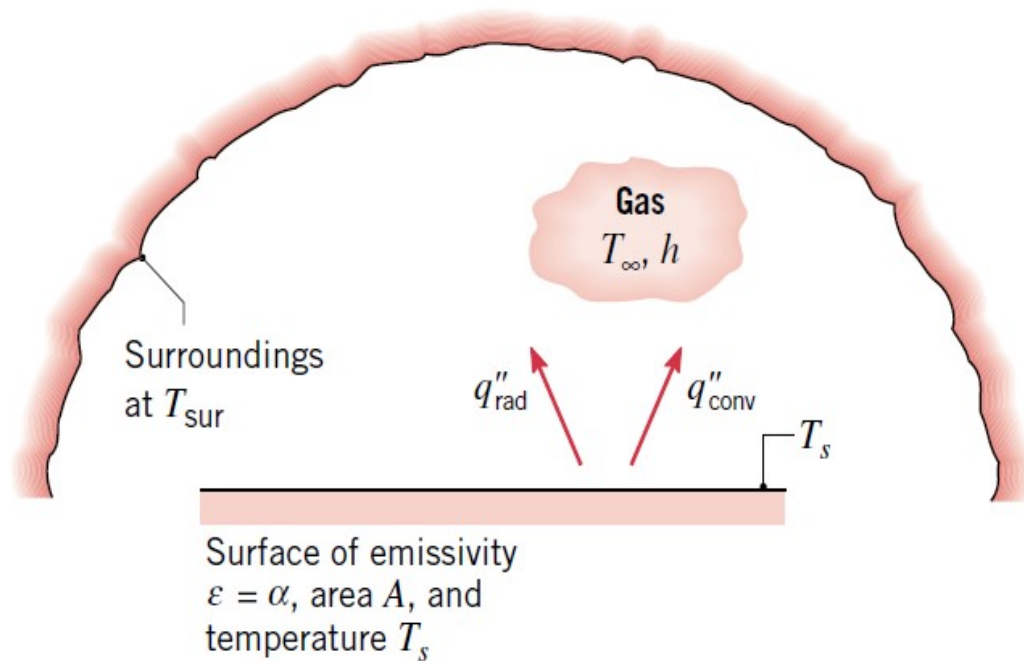
$$E = \varepsilon \sigma T_e^4 \quad \varepsilon \text{ — степень черноты,}$$

$$\dot{Q}_e = EF, \text{ Вт.}$$

Закон Стефана-Больцмана устанавливает зависимость плотности потока излучения от температуры. При этом поверхность может не только излучать энергию, но и поглощать излученную другим телом энергию. Величина поглощенной энергии определяется величиной коэффициента поглощения.



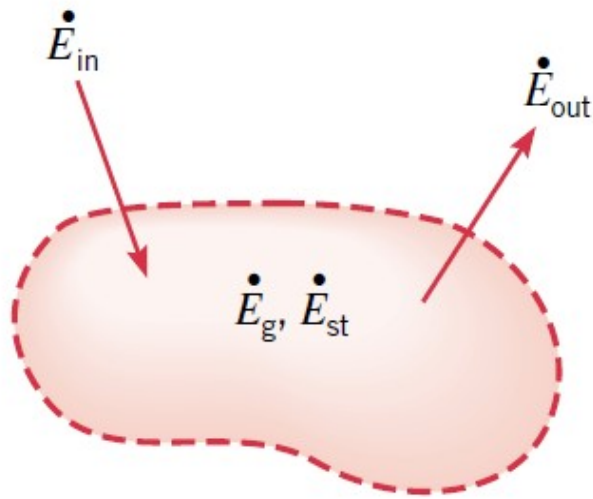
Процесс излучения в общем случае сопровождается конвекцией



В этом случае

$$\dot{Q} = \alpha F (T_s - T_\infty) + \epsilon F \sigma (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4)$$

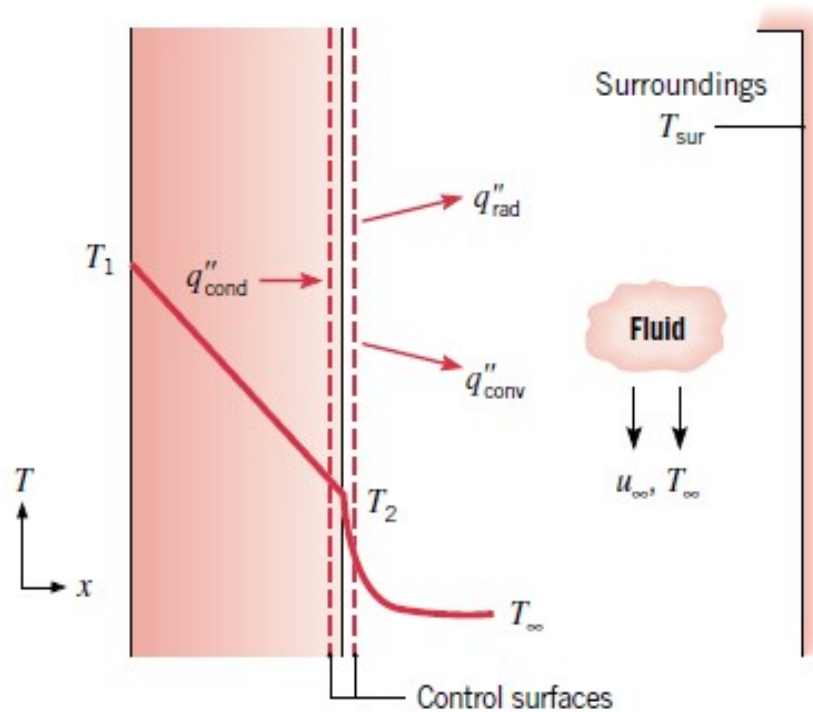
Теплообмен и первый закон термодинамики.



$$\dot{E}_i - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st}$$

$$\Delta E_{st} = \int_{\tau}^{(\tau+\Delta\tau)} \dot{E}_i d\tau - \int_{\tau}^{(\tau+\Delta\tau)} \dot{E}_{out} d\tau = E_i - E_{out}$$

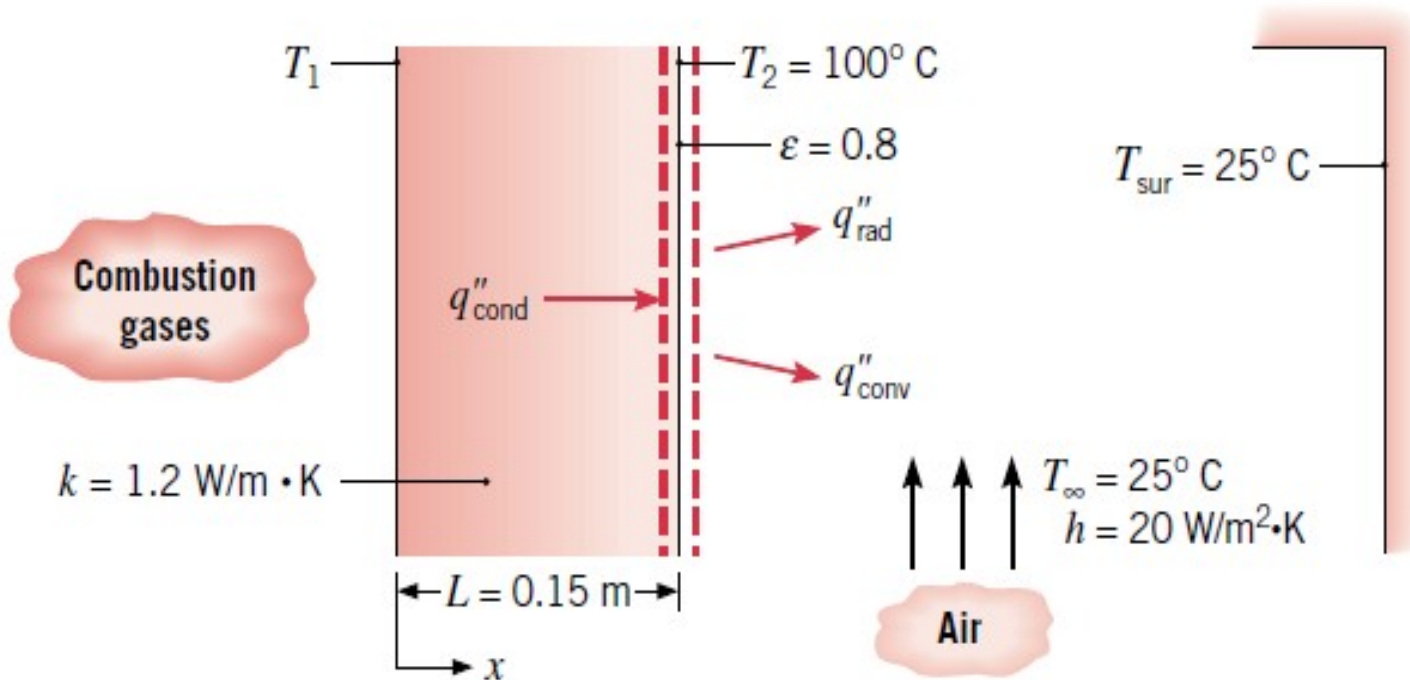
Баланс энергии на поверхности



Для поверхности справедливо

$$\dot{Q}_{\text{конд}} = \dot{Q}_{\text{конв}} + \dot{Q}_{\text{рад}}$$

Пример



Температура на наружной поверхности кирпичной стены равна 100°C . Толщина стены 15 см , коэффициент теплопроводности $\lambda = 1.2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, степень черноты $\varepsilon = 0.8$. Температура окружающей среды 25°C , коэффициент теплоотдачи $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Чему равна температура на внутренней поверхности стены при стационарном протекании процесса.

Решение

$$\dot{Q}_{\text{конд}} = \dot{Q}_{\text{конв}} + \dot{Q}_{\text{рад}}$$

$$\lambda \frac{T_1 - T_2}{L} = \alpha (T_2 - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_2^2 - T_{\text{sur}}^2)$$

$$1.2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}} \frac{T_1 - 373}{0.15 \text{ м}} = 20 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}} (373 - 298) + 0.8 (5.67 * 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}^4}) (373^4 - 298^4) \text{ К}^4$$

$$T_1 = 625 \text{ К} = 352^\circ \text{С}$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности

При решении задач, связанных с нахождением температурного поля, необходимо иметь дифференциальное уравнение теплопроводности. При выводе этого уравнения принимаются следующие допущения:

- тело однородно и изотропно;
- физические параметры постоянны;
- объем не меняется при нагреве;
- внутренние источники теплоты в теле, которые в общем случае могут быть заданы как $q_v = f(x, y, z, t)$, распределены равномерно.

Само уравнение имеет вид

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

a – коэффициент температуропроводности, свойство вещества. Характеризует меру теплоинерционных свойств вещества. Для любой точки пространства изменение температуры во времени пропорционально величине a . Таким образом, чем больше a , тем выше скорость изменения температуры в любой точке тела. Жидкости и газы обладают большой тепловой инерционностью (малым значением a), металлы имеют большой коэффициент температуропроводности и обладают малой тепловой инерционностью.

Условия однозначности для процессов теплопроводности

Приведенное соотношение описывает явление теплопроводности в общем виде. Для того, чтобы получить описание конкретного процесса, необходимо задать условия однозначности или краевые условия. Эти условия включают

- геометрические характеристики тела;
- физические свойства тела и среды;
- начальные условия (распределение температур в начальный момент времени);
- граничные условия, которые характеризуют взаимодействие рассматриваемого тела с окружающей средой.