



Нестационарная  
теплопередача через  
ограждающие конструкции.  
Теплоустойчивость.



Актуальность



1. В реальных условиях большинство процессов, происходящих в о.к. зданий являются нестационарными (изменяющимися во времени).

Примеры:

- суточные колебания температуры наружного воздуха (до 30 °С);
- поступления тепла от технологического оборудования; бытовые теплопоступления;
- изменение теплоотдачи систем отопления (аварии);
- печное отопление (периодичность топки - 1 или 2 раза в сутки);
- применение систем с прерывистой подачей тепла (остывание - натоп);
- периоды резких похолоданий и др.

2. Увязка строительных решений зданий с особенностями климата

Примеры:

- тропические страны с постоянными температурами наружного воздуха - о.к. легкие, воздухопроницаемые;
- страны Средней Азии - с резкоконтинентальным климатом - массивные о.к. , с большой инерцией.

3. Увязка режима эксплуатации здания с его о.к.:

- переменный режим эксплуатации (дача) - о.к. с небольшой тепловой инерцией;
- постоянный режим эксплуатации (жилье, общественные здания) - о.к. с большой тепловой инерцией.

## Основные этапы развития отечественной теории теплоустойчивости

- **Власов О.В.** - 1920 - 1930 гг. - печное отопление - периодичность топки - 12 часов - 24 часа - период колебаний - коэффициент теплоусвоения материала - коэффициент теплоусвоения поверхности - влияние расположения различных слоев в конструкциях
- **Муромов И.С.** - 1930 - начало 1940 гг. - решение задачи затухания гармонических колебаний температур в многослойных ограждающих конструкциях на основе применения гиперболических функций комплексных переменных
- **Фокин К.Ф.** - конец 1930 - начало 1940 гг. применение теории теплоустойчивости к выбору расчетных температур наружного воздуха - введение понятия тепловой инерции конструкций - увязка расчетных температур - наиболее холодной пятидневки - холодных суток - с тепловой инерцией
- **Шкловер А.М.** - разработка основ современной теории теплоустойчивости - способность ограждающих конструкций гасить периодические колебания температур наружного воздуха - классическая теория теплоустойчивости - выход на прогнозирование теплового режима помещений в летний период времени
- **Богословский В.Н.** - развитие теории теплоустойчивости применительно к летним условиям эксплуатации зданий





## Основные положения

**Коэффициент теплопроводности** материала - показатель, характеризующий способность строительных материалов проводить тепло -  $\lambda$ , [Вт/м °С];

**Сопротивление теплопередаче** ограждающих конструкций - показатель, характеризующий способность **теплотехнически однородных** ограждающих конструкций сопротивляться прохождению теплового потока, [м<sup>2</sup> °С/Вт]

$$R_o = 1/\alpha_{int} + R + 1/\alpha_{ext}$$

**Коэффициент теплопередачи** ограждающих конструкций - показатель, характеризующий способность ограждающих конструкций передавать тепловой поток, [м<sup>2</sup> °С/Вт]

$$k_o = 1/R_o$$

**Термическое сопротивление слоя** - показатель, численно равный отношению толщины слоя к его коэффициенту теплопроводности -  $R_i$ , [м<sup>2</sup> °С/Вт]

$$R_i = \delta_i/\lambda_i$$

**Термическое сопротивление конструкции** - показатель, численно равный сумме термических сопротивлений отдельных слоев этой конструкции -  $R$ , [м<sup>2</sup> °С/Вт] -  $R = \sum \delta_i/\lambda_i$

**Удельная теплоемкость** материала - показатель, характеризующий количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг материала на один градус -  $c$ , [кДж/кг °С]; воздух (сухой) -  $c = 1,005$  кДж/кг °С; вода -  $c = 4,186$  кДж/кг °С;

**Плотность материала** - отношение массы тела к занимаемому этим телом объему -  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>]

**Объемная теплоемкость** - показатель, численно равный произведению плотности на удельную теплоемкость материала -  $c \cdot \rho$  [кДж/°С м<sup>3</sup>]

**Температуропроводность** - (коэффициент температуропроводности) — физическая величина, характеризующая скорость изменения (выравнивания) температуры материала (вещества) в неравновесных тепловых процессах. Численно равна отношению теплопроводности к объёмной теплоёмкости -  $a = \lambda / c \cdot \rho$ , [м<sup>2</sup>/с]

**Теплоусвоение** - показатель, характеризующий способность материалов воспринимать теплоту при колебаниях теплового потока или температуры воздуха.

**Коэффициент теплоусвоения материала** – показатель, характеризующий способность материала воспринимать тепло при периодических колебаниях теплового потока -  $s$  [Вт/м<sup>2</sup> °С];

**Коэффициент теплоусвоения поверхности** – показатель, характеризующий способность поверхности материала воспринимать тепло при периодических колебаниях теплового потока -  $Y$  [Вт/м<sup>2</sup> °С];

**Тепловая инерция конструкции** – показатель, характеризующий способность о.к. сопротивляться изменению температуры за определённое время -  $D$  , ( $D = R \cdot s$ ) ;

**Теплоустойчивость о.к.** – показатель, характеризующий способность о.к. сохранять постоянство температур на ее внутренней поверхности при колебаниях температур наружного или внутреннего воздуха -  $v$  , ( $v = A_{TB} / A_{TH}$ );

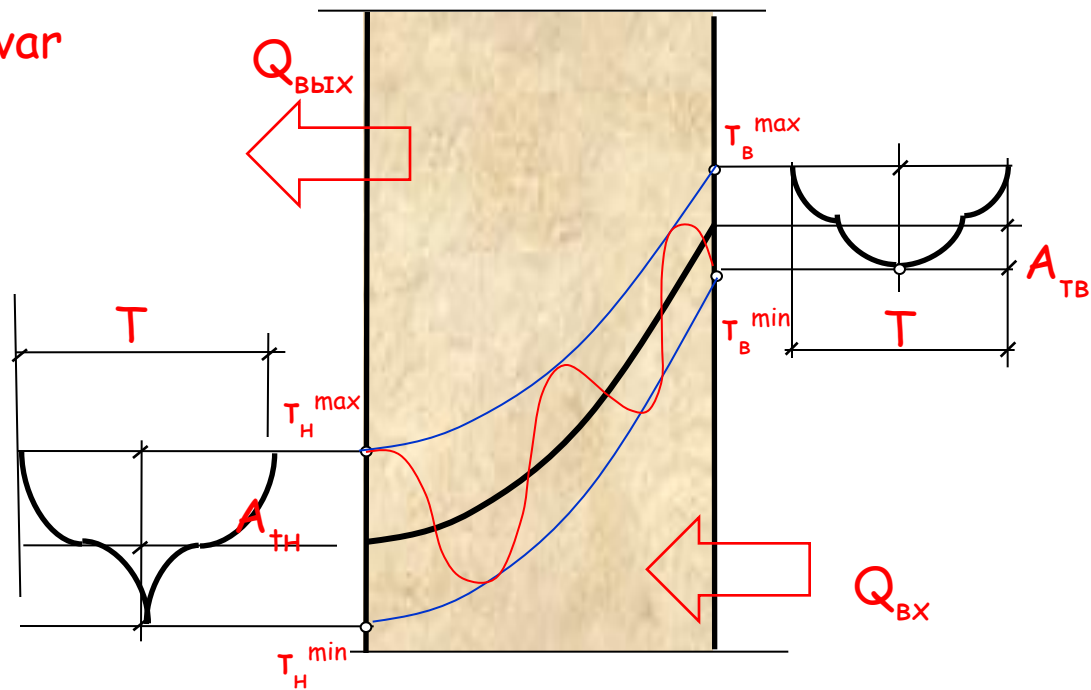
**Теплоустойчивость здания (помещения)** – показатель, характеризующий способность здания сохранять постоянство температур внутреннего воздуха при колебаниях температур наружного воздуха -  $v$  , ( $v = A_{TB} / A_{TH}$ );





$\tau_{x,z}$

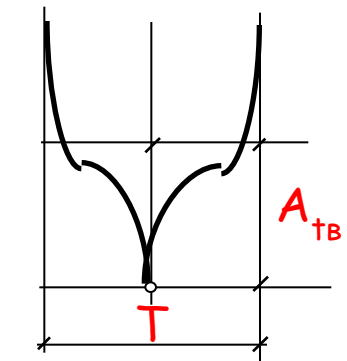
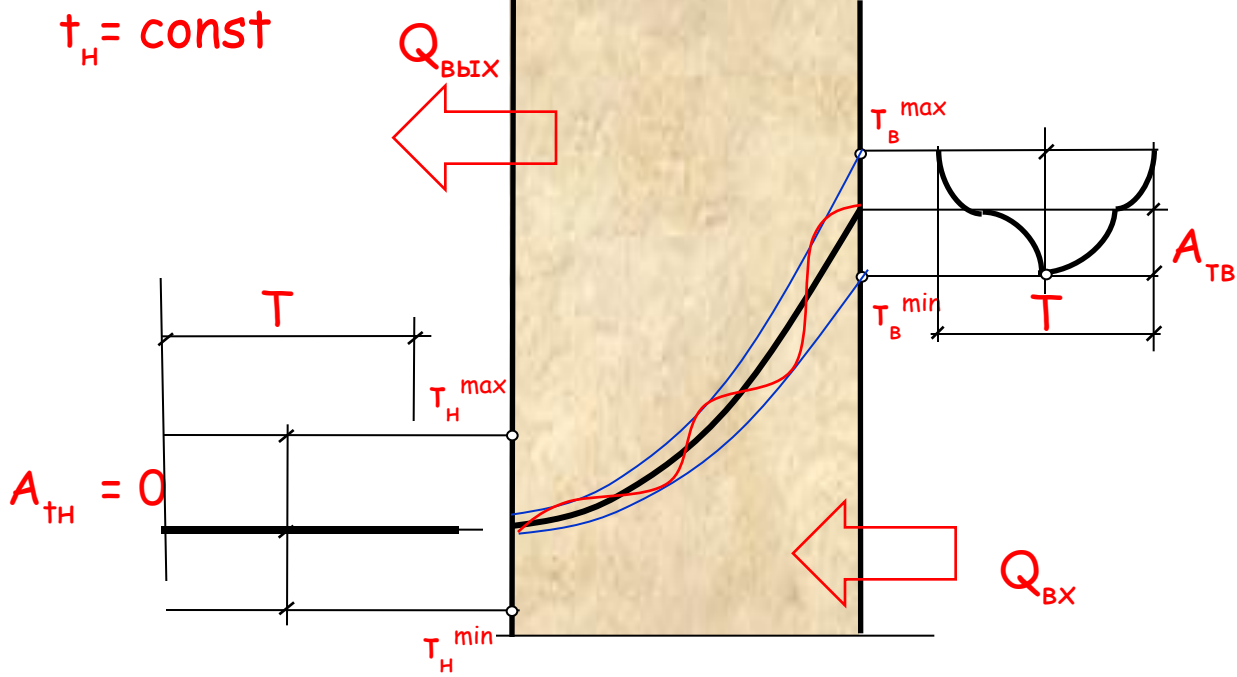
$t_H = \text{var}$



$t_B = \text{const}$



$\tau_{x,z}$

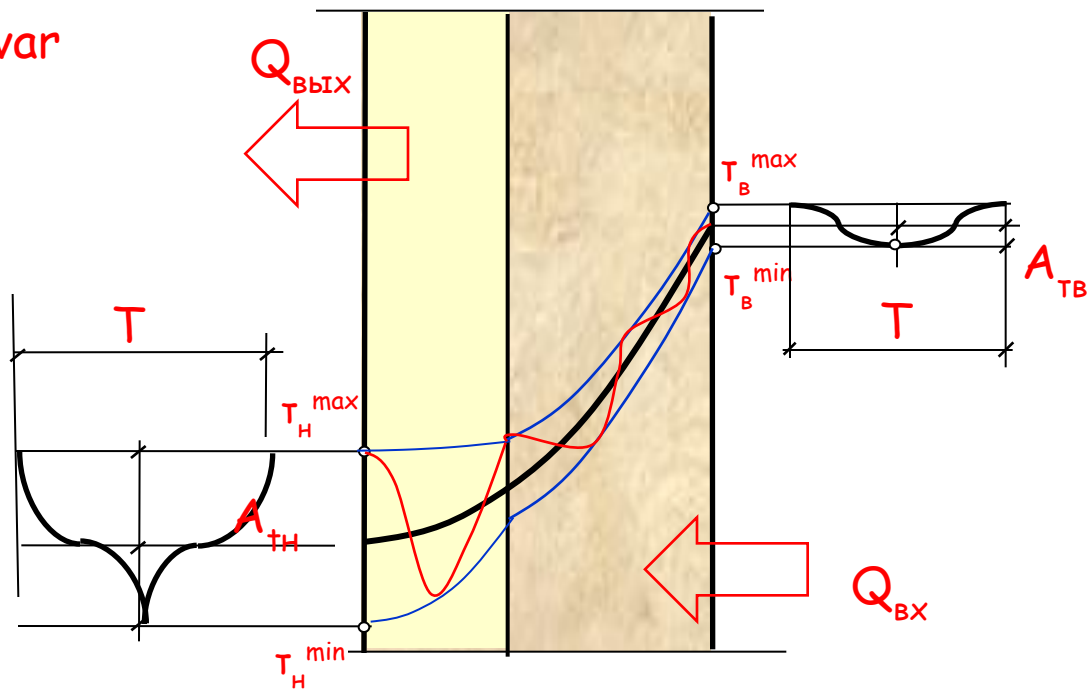


$t_B = \text{var}$



$\tau_{x,z}$

$t_H = \text{var}$

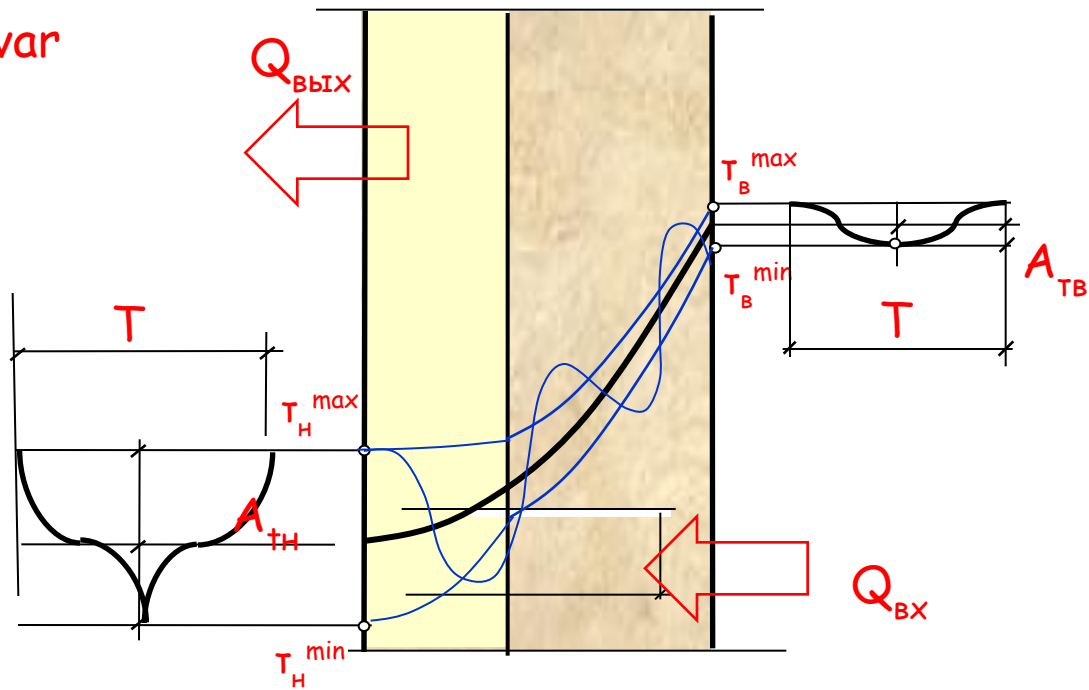


$t_B = \text{const}$



$\tau_{x,z}$

$t_H = \text{var}$

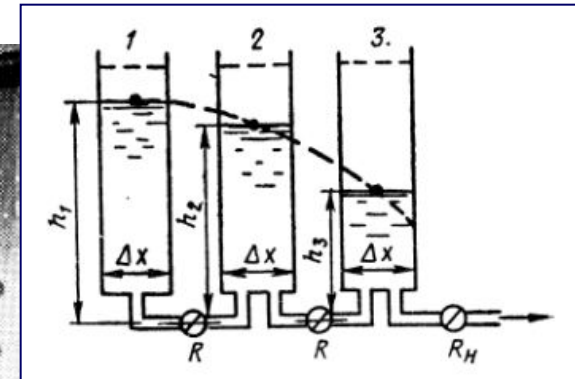
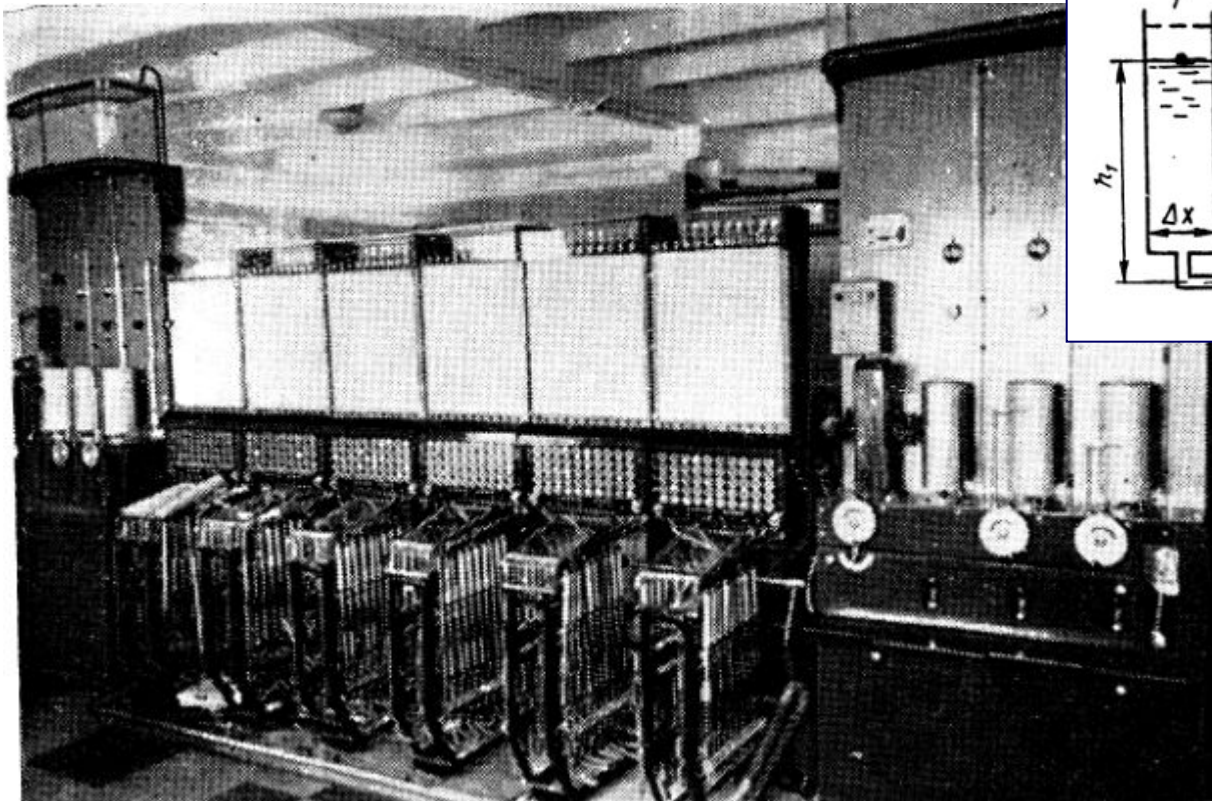



$t_B = \text{const}$

Основная задача - расчет распределения температур по сечению конструкции во времени.

Варианты решение задачи:

- моделирование на гидроинтеграторе (устаревший метод - до 1980 гг.)
- аналитические решения (частные случаи)
- численные методы (приближенные решения)





Для вывода дифференциального уравнения теплопроводности рассмотрим сначала случай одномерной задачи, т. е. когда движение тепла происходит только в направлении одной из осей координат, например при передаче тепла через неограниченно протяженную плоскую стенку. Выделим внутри такой стенки бесконечно тонкий слой толщиной  $dx$ , в котором температура изменяется на величину  $dt$ . Если бы температура слоя не изменялась во времени, т. е. при стационарном тепловом потоке, то количество тепла, проходящего через  $1 \text{ м}^2$  этого слоя в течение  $1 \text{ ч}$ , было бы равно:


$$Q_1 = -\lambda \frac{dt}{dx},$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности среды в  $\text{ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}^*$ .

Отношение  $dt/dx$  носит название градиента температуры и имеет размерность  $\text{град/м}$ . Знак минус в правой части уравнения поставлен потому, что движение тепла происходит в направлении понижения температуры (отрицательный градиент температуры).

В общем случае (нестационарные условия теплопередачи) величина теплового потока при прохождении его через выделенный слой будет изменяться. Для определения величины изменения теплового потока по толщине слоя нужно предыдущее уравнение продифференцировать по  $dx$ , тогда получим:

$$\frac{dQ_1}{dx} = -\lambda \frac{d^2t}{dx^2}. \quad (\text{a})$$



Изменение величины теплового потока связано с поглощением или выделением тепла слоем при изменении его температуры во времени. Количество тепла  $dQ_2$ , необходимое для повышения температуры слоя толщиной  $dx$  на  $dt$  градусов за промежутки времени  $dz$ , будет пропорционально теплоемкости слоя, равной  $c\gamma dx$ , т. е.

$$dQ_2 = -c\gamma dx \frac{dt}{dz},$$

где  $c$  — удельная теплоемкость материала слоя в *ккал/кг·град*.

Знак минус в правой части этого уравнения поставлен потому, что повышение температуры слоя связано с поглощением им тепла и уменьшением величины теплового потока ( $dQ_2$  — отрицательная величина).

Последнее уравнение может быть написано в частных производных в виде:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial x} = -c\gamma \frac{\partial t}{\partial z}; \quad (6)$$

оно показывает изменение величины теплового потока по толщине слоя в результате аккумуляции им тепла.

Так как изменение величины теплового потока в слое при отсутствии в нем внутренних источников тепла является следствием только поглощения тепла слоем, величины  $\frac{dQ_1}{dx}$  и  $\frac{\partial Q_2}{\partial x}$  должны быть равны, откуда из уравнений (а) и (б) получим:


$$\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c\gamma} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (1)$$



Это и есть дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерного движения тепла, т. е. только в направлении одной из осей координат. Величина  $\frac{\lambda}{c\gamma}$  носит название «коэффициента температуропроводности» материала, обозначается буквой  $a$  и имеет размерность  $m^2/ч$ .

Физический смысл уравнения (1) заключается в следующем. Левая часть уравнения представляет изменение температуры среды во времени. Производная, стоящая в правой части уравнения, дает пространственное изменение градиента температуры. Следовательно, уравнение (1) показывает, что в каждой точке среды изменение температуры во времени пропорционально пространственному изменению градиента температуры. Коэффициент температуропроводности  $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$  является коэффициентом этой пропорциональности, следовательно, его физический смысл состоит в том, что он характеризует скорость выравнивания температуры в различных точках среды. Чем больше будет величина  $a$ , тем скорее все точки какого-либо тела при его остывании или нагреве достигнут одинаковой температуры.





В общем случае движение тепла может происходить во всех направлениях (по всем трем осям координат), тогда дифференциальное уравнение теплопроводности будет иметь вид:

$$\frac{\partial t}{\partial z} = a \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right]. \quad (2)$$

Решение задач, связанных с передачей тепла теплопроводностью, сводится к интегрированию дифференциальных уравнений Фурье (1) и (2), при этом для того, чтобы найти постоянные интегрирования, необходимо знать граничные условия. Граничные условия разделяются на временные и пространственные. Временные граничные условия состоят в задании начального распределения температуры, т. е. распределения температуры в момент времени  $z=0$ . Пространственные граничные условия относятся к поверхностям, ограничивающим данную среду. Различают три рода граничных условий.

Граничное условие I рода — заданы распределение температуры на поверхности и ее изменение во времени. Это условие является наиболее простым, но в практике встречается редко.

Граничное условие II рода — заданы величины теплового потока, проходящего через поверхность, и его изменения во времени. Следовательно, в этом случае известен угол наклона касательной к температурной кривой в точке ее пересечения с поверхностью, но не величина температуры этой поверхности.



Граничное условие III рода — заданы температура среды, окружающей поверхность (обычно воздуха или жидкости), и закон теплообмена между поверхностью и окружающей средой. Это граничное условие наиболее сложное и вместе с тем наиболее распространенное в практических случаях.

Аналитическое решение дифференциальных уравнений теплопроводности представляет собой сложные математические задачи, которые в настоящее время могут быть решены с применением электронно-вычислительных машин. Точные инженерные решения имеются лишь для некоторых частных случаев и при ряде упрощающих предпосылок. В частности, из задач, имеющих значение для строительного проектирования, решены следующие:

1) остывания и нагревания однородной плоской стенки или цилиндра с одинаковой начальной температурой во всех точках в окружающей среде с постоянной температурой;

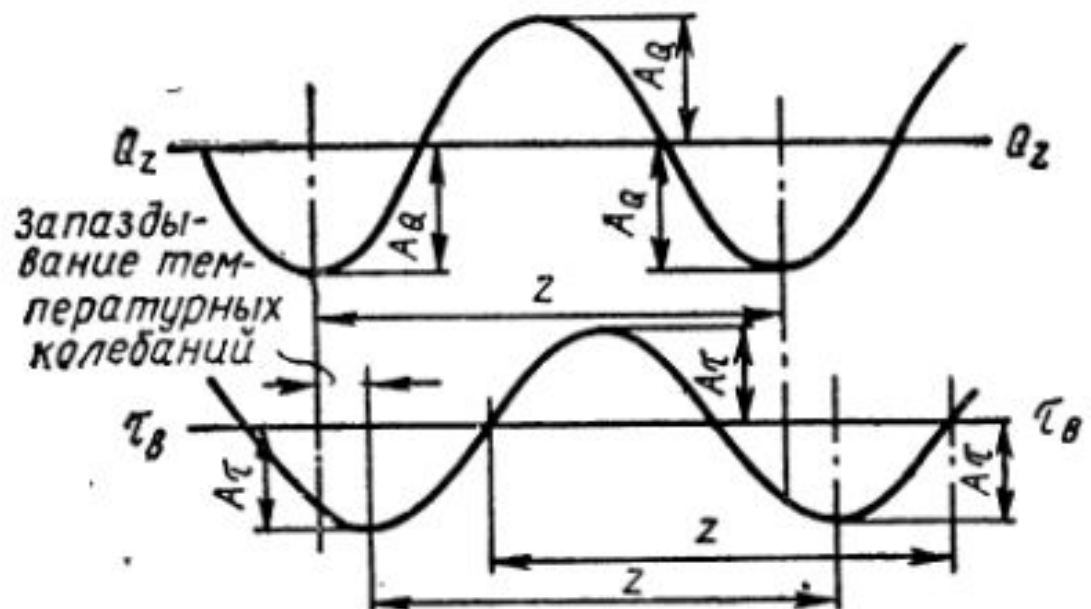
2) изменения температуры во времени в плоской стенке при гармонических колебаниях температуры окружающего воздуха;

3) изменения во времени температуры в плоской стенке неограниченной толщины при мгновенном изменении температуры на ее поверхности;

4) промерзания влажной почвы при условиях предыдущей задачи (в этом случае учитывается влияние на процесс теплопередачи изменения агрегатного состояния влаги почвы).



Теплоустойчивость о.к.



Изменения теплового потока и температуры внутренней поверхности о.к.

Отношение величины амплитуды колебания теплового потока  $A_Q$  к величине амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности ограждения  $A_\tau$  носит название коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности ограждения  $Y_B$ . Таким образом:

$$Y_B = \frac{A_Q}{A_\tau}.$$



Если ограждение состоит из одного материала и имеет очень большую толщину, то теплоусвоение его внутренней поверхности при заданном периоде колебания температуры будет зависеть только от свойств этого материала. В этом случае теплоусвоение представляет физическую характеристику материала ограждения и носит название коэффициента теплоусвоения материала  $s$ .

Таким образом, коэффициент теплоусвоения материала характеризует способность материала более или менее интенсивно воспринимать тепло при колебании температуры на его поверхности. Коэффициент теплоусвоения материала имеет ту же размерность, что и коэффициент теплоусвоения поверхности ограждения, т. е.  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$ . Величина коэффициента теплоусвоения материала зависит от коэффициента теплопроводности его  $\lambda$ , удельной теплоемкости  $c$  и объемного веса  $\gamma$ , а также от периода колебания теплового потока  $Z$  и определяется по формуле

$$s = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c\gamma}{Z}}. \quad (47)$$

В частном случае при  $Z=24$  ч формула (47) принимает вид:

$$s_{24} = 0,51 \sqrt{\lambda c\gamma}. \quad (47a)$$

При  $Z=12$  ч будем иметь:

$$s_{12} = 0,72 \sqrt{\lambda c\gamma} = 1,41 s_{24}. \quad (47b)$$



Если встать босой ногой на деревянный пол, а затем на бетонный, то в первом случае мы почувствуем, что пол теплый, а во втором случае, что пол холодный, несмотря на то, что температура обоих полов одинакова. Объясняется это тем, что пол отнимает тепло от обнаженной ноги. В первом случае вследствие не-

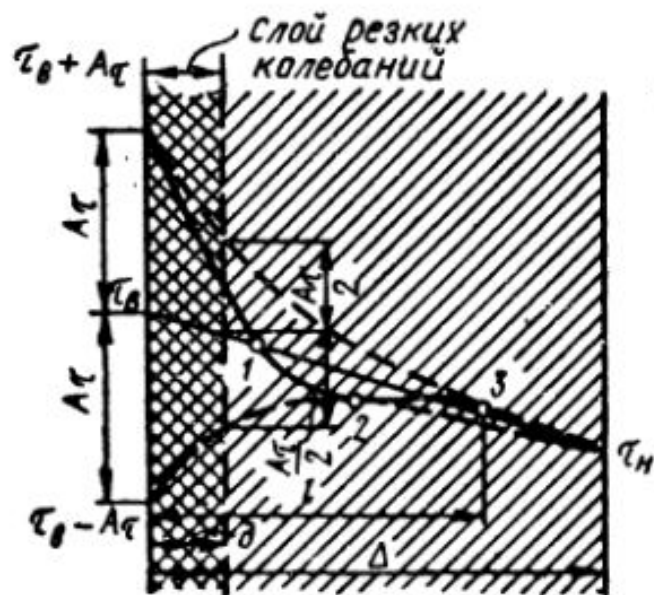


Схема колебания температуры в толще ограждения

большей величины теплоусвоения древесины будет отниматься меньшее количество тепла, что и дает ощущение теплого пола. Во втором случае вследствие значительной величины теплоусвоения бетона будет отниматься в три раза большее количество тепла, что дает ощущение холодного пола, так как организм человека реагирует не на температуру окружающей среды, а на интенсивность отдачи тепла его телом.

Покрытие поверхности пола ковром резко понижает его коэффициент теплоусвоения, что опять же ощущается как повышение его температуры,

хотя в действительности этого может и не быть.

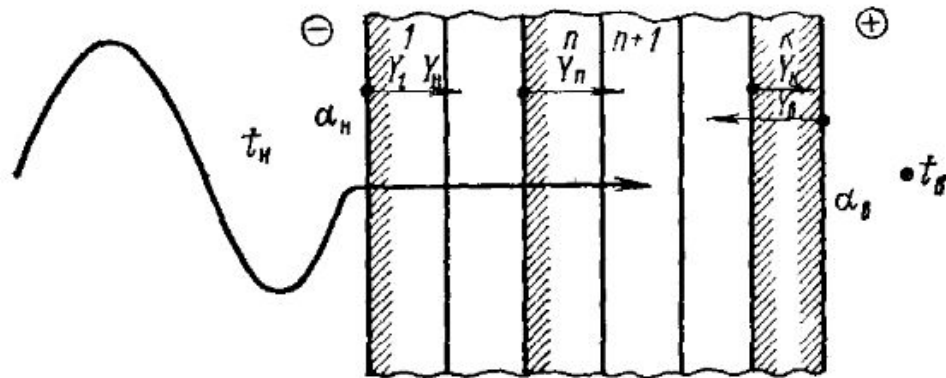


Таким образом, в толще ограждения образуется температурная волна, затухающая по мере проникания ее в толщу ограждения. Расстояние между двумя максимумами или двумя минимумами волны  $l$  носит название длины волны. Для характеристики числа волн, располагающихся в толще данного ограждения, может служить величина его «показателя тепловой инерции  $D$ »\*. Показатель тепловой инерции однородного ограждения определяется как произведение его термического сопротивления  $R$  на коэффициент теплоусвоения материала ограждения  $s$ , т. е.

$$D = Rs.$$

Для ограждения, состоящего из нескольких слоев, показатель тепловой инерции его определяется как сумма показателей тепловой инерции отдельных слоев, т. е.

$$D = R_1 s_1 + R_2 s_2 + \dots + R_n s_n.$$



Расположение, нумерация слоев и порядок определения характеристик теплоусвоения в многослойных ограждениях (инженерный метод расчета)

При определении  $Y_n$  произвольного сечения  $n$  в ограждении могут встретиться следующие характерные случаи (на примере передачи температурных колебаний в сторону помещения).

1) Условная толщина однородного материального слоя  $n$  от заданного сечения  $n^*$  в конструкции ограждения равна или больше 1, т. е.  $D_n \geq 1$ , тогда

$$Y_n = S_n.$$

2) Слой резких колебаний захватывает второй от заданной поверхности материальный слой, т. е. только  $D_n + D_{n+1} \geq 1$ , тогда [см. (IV 84)]



# Нормирование и расчеты теплоустойчивости о.к.зданий

## 11.1 ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА

11.1.1 При проектировании ограждающих конструкций с учетом их теплоустойчивости необходимо руководствоваться следующими положениями:

теплоустойчивость конструкции зависит от порядка расположения слоев материалов; величина затухания амплитуды колебаний температуры наружного воздуха  $\nu$  в двухслойной конструкции увеличивается, если более теплоустойчивый материал расположен изнутри;

наличие в конструкции ограждения воздушной прослойки увеличивает теплоустойчивость конструкции. В замкнутой воздушной прослойке целесообразно устраивать теплоизоляцию с теплоотражающей поверхностью: слои конструкции, расположенные между вентилируемой наружным воздухом воздушной прослойкой и наружной поверхностью ограждающей конструкции, должны иметь минимально возможную толщину. Наиболее целесообразно выполнять эти слои из тонких металлических или асбестоцементных листов.

11.1.2 Теплоустойчивость ограждающей конструкции здания должна соответствовать требованиям СНиП 23-02; для этого определяют нормируемую амплитуду колебаний температуры внутренней поверхности ограждающей конструкции  $A_T^{req}$ , °С, по формуле (11) СНиП 23-02

$$A_T^{req} = 2,5 - 0,1(t_{ext} - 21), \quad (46)$$

где  $t_{ext}$  - средняя месячная температура наружного воздуха за июль, °С, принимаемая согласно СНиП 23-01.

11.1.3 Величину затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха  $\nu$  в ограждающей конструкции, состоящей из однородных слоев, рассчитывают по формуле

$$\nu = 0,9 \cdot 2,718^{D/\sqrt{2}} \left[ (s_1 + \alpha_{int})(s_2 + Y_1) \dots (s_n + Y_{n-1}) \times \right. \\ \left. \times (\alpha_{ext} + Y_n) \right] / [(s_1 + Y_1)(s_2 + Y_2) \dots (s_n + Y_n) \alpha_{ext}], \quad (47)$$

где  $D$  - тепловая инерция ограждающей конструкции, определяемая по формуле (53);

$s_1, s_2, \dots, s_n$  - расчетные коэффициенты теплоусвоения материала отдельных слоев ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°C), принимаемые по приложению Д или по результатам теплотехнических испытаний;

$Y_1, Y_2, \dots, Y_{i-1}, Y_i$  - коэффициенты теплоусвоения наружной поверхности отдельных слоев ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°C), определяемые согласно 11.1.6;

$\alpha_{int}$  - то же, что и в формуле (8);