



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 °C);
- 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 (жилые, 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 – λ , [Вт/м °С];

Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций – показатель, характеризующий способность **теплотехнически однородных** ограждающих конструкций сопротивляться прохождению теплового потока, [м² °С/Вт]

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

Коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций – показатель, характеризующий способность ограждающих конструкций передавать тепловой поток, [м² °С/Вт]

$$k_o = 1/R_o$$

Термическое сопротивление слоя – показатель, численно равный отношению толщины слоя к его коэффициенту теплопроводности – R_i , [м² °С/Вт]

$$R_i = \delta_i / \lambda_i$$

Термическое сопротивление конструкции – показатель, численно равный сумме термических сопротивлений отдельных слоев этой конструкции – R , [м² °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 °C]; воздух (сухой) – $c = 1,005$ кДж/кг °C; вода – $c = 4,186$ кДж/кг °C;

Плотность материала – отношение массы тела к занимаемому этим телом объему – ρ [кг/м³]

Объемная теплоемкость – показатель, численно равный произведению плотности на удельную теплоемкость материала – $c \cdot \rho$ [кДж/°C м³]

Температуропроводность – (коэффициент температуропроводности) — физическая величина, характеризующая скорость изменения (выравнивания) температуры материала (вещества) в неравновесных тепловых процессах. Численно равна отношению теплопроводности к объёмной теплоёмкости – $a = \lambda / c \cdot \rho$, [м²/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/м² °С];

Коэффициент теплоусвоения поверхности – показатель, характеризующий способность поверхности материала воспринимать тепло при периодических колебаниях теплового потока - Y [Вт/м² °С];

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

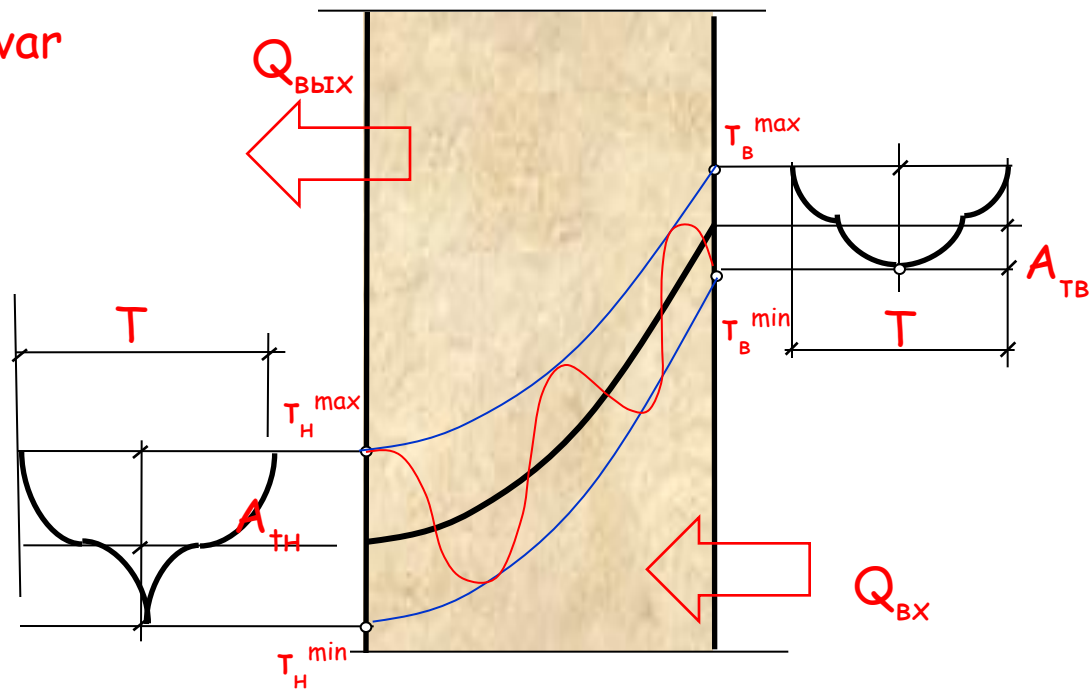
Теплоустойчивость о.к. – показатель, характеризующий способность о.к. сохранять постоянство температур на ее внутренней поверхности при колебаниях температур наружного или внутреннего воздуха - v , ($v = A_{\text{тв}} / A_{\text{тн}}$);

Теплоустойчивость здания (помещения) – показатель, характеризующий способность здания сохранять постоянство температур внутреннего воздуха при колебаниях температур наружного воздуха - v , ($v = A_{\text{тв}} / A_{\text{тн}}$);



$\tau_{x,z}$

$t_H = \text{var}$

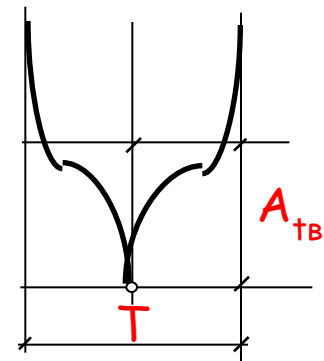
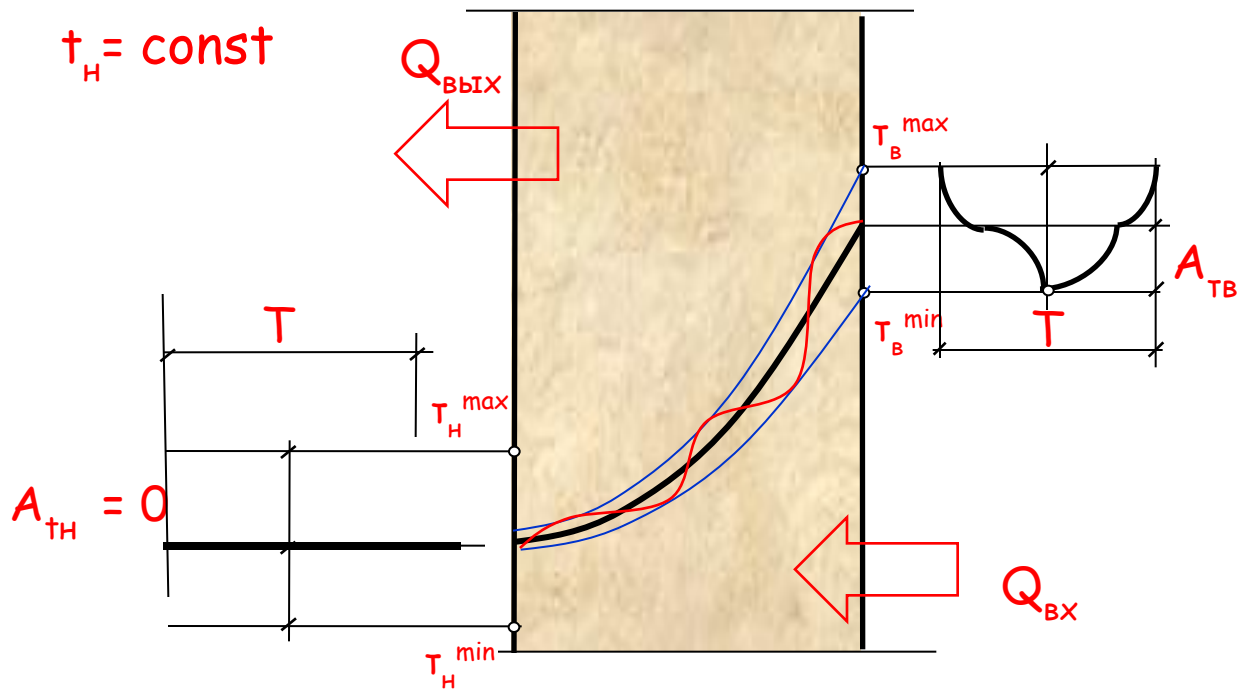


$t_B = \text{const}$



$\tau_{x,z}$

$t_H = \text{const}$

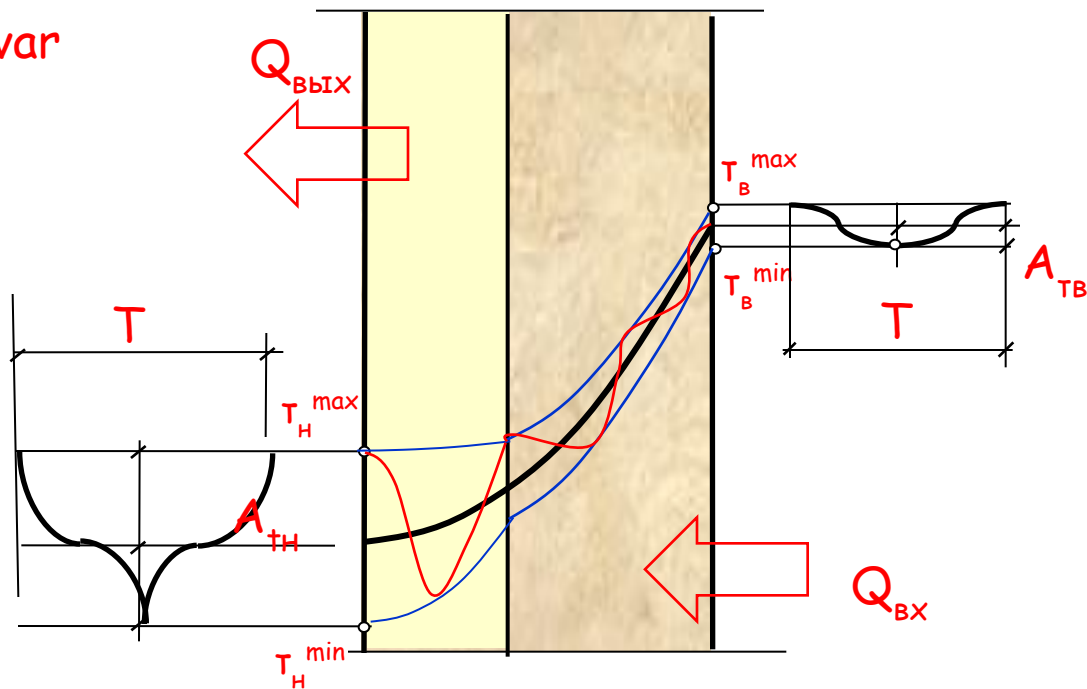


$t_B = \text{var}$



$\tau_{x,z}$

$t_H = \text{var}$

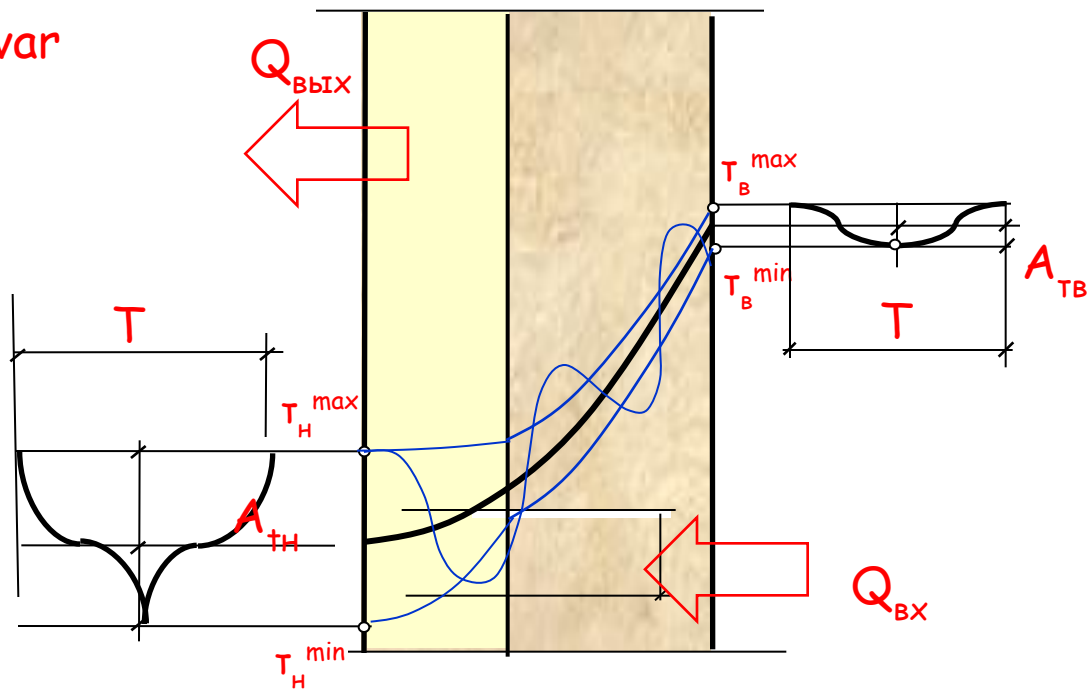


$t_B = \text{const}$



$\tau_{x,z}$

$t_H = \text{var}$

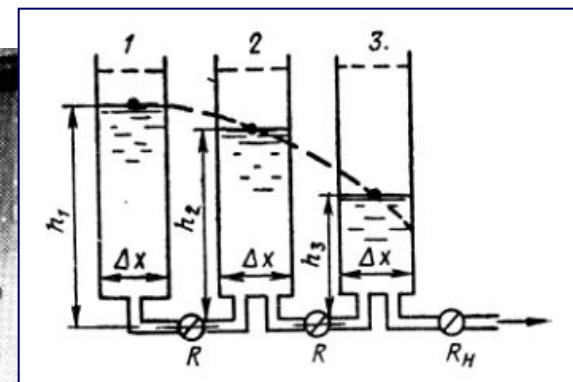
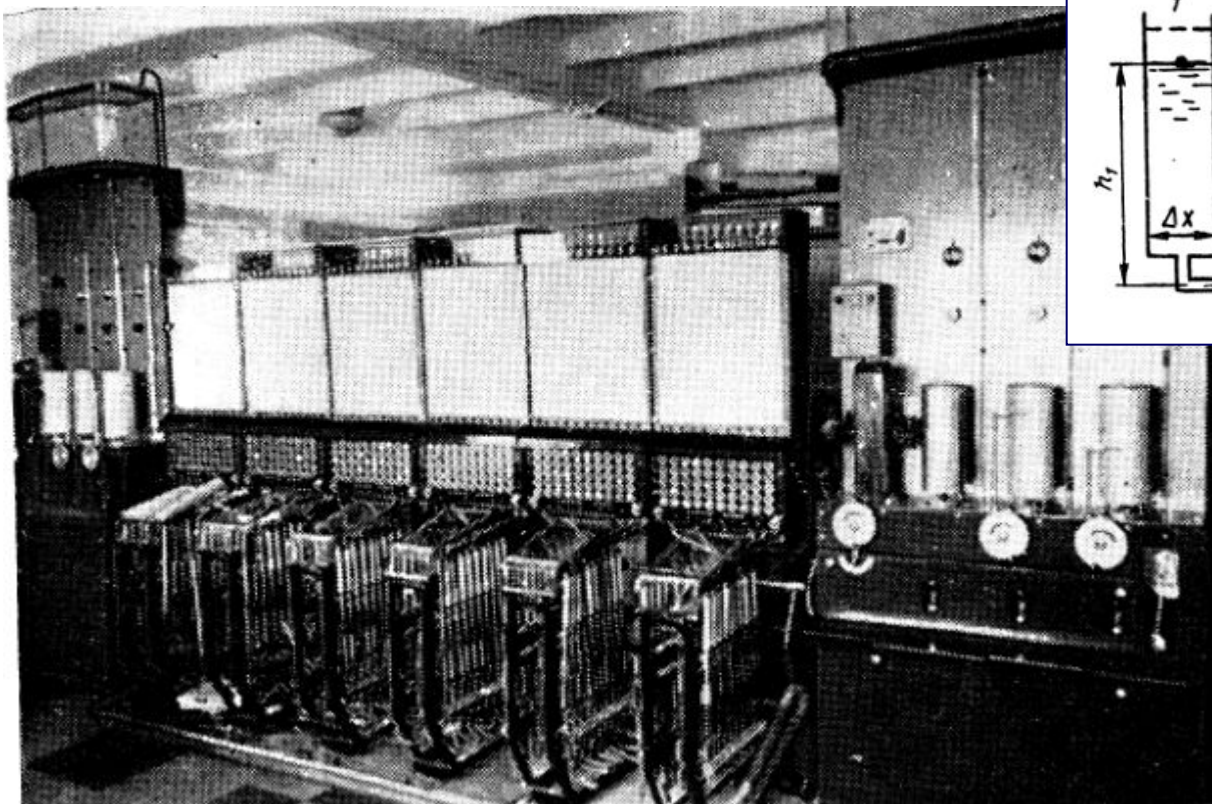


$t_B = \text{const}$

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 м^2 этого слоя в течение 1 ч , было бы равно:

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

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

Отношение dt/dx носит название градиента температуры и имеет размерность 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 промежуток 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 аккумулялирования 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;

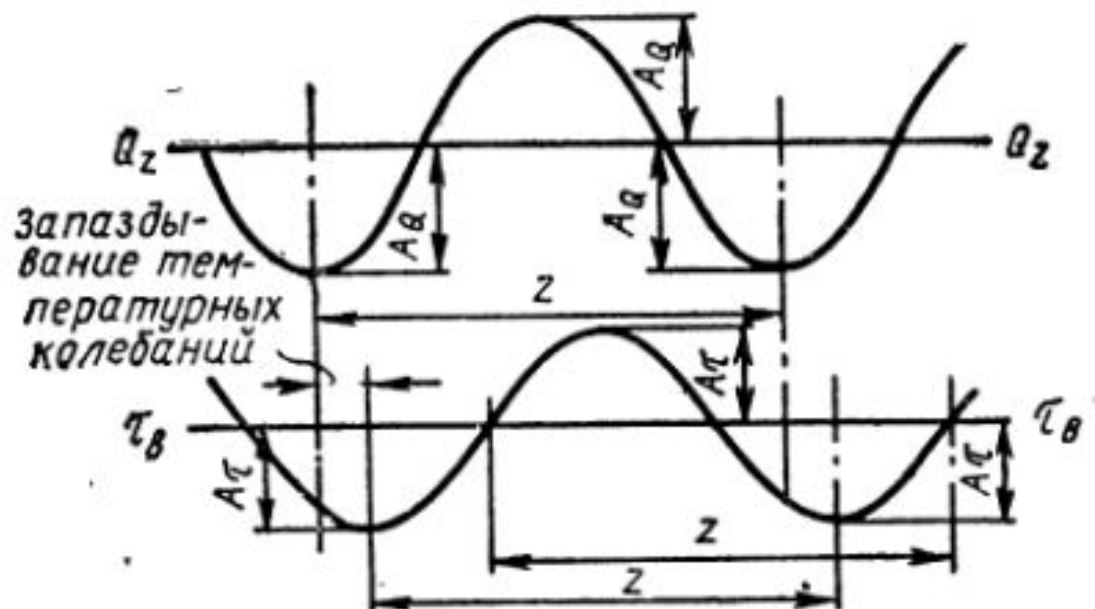
2) изменения температуры во времени в плоской стенке при гармонических колебаниях температуры окружающего воздуха;

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_τ носит название коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности ограждения Y_v . Таким образом:

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



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. $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$. Величина коэффициента теплоусвоения материала зависит от коэффициента теплопроводности его λ , удельной теплоемкости c и объемного веса γ , 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-

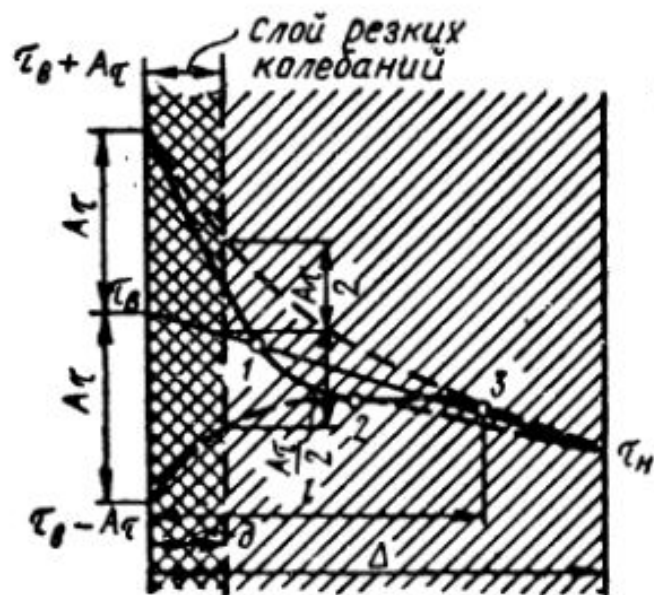


Схема колебания температуры в толще ограждения

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.

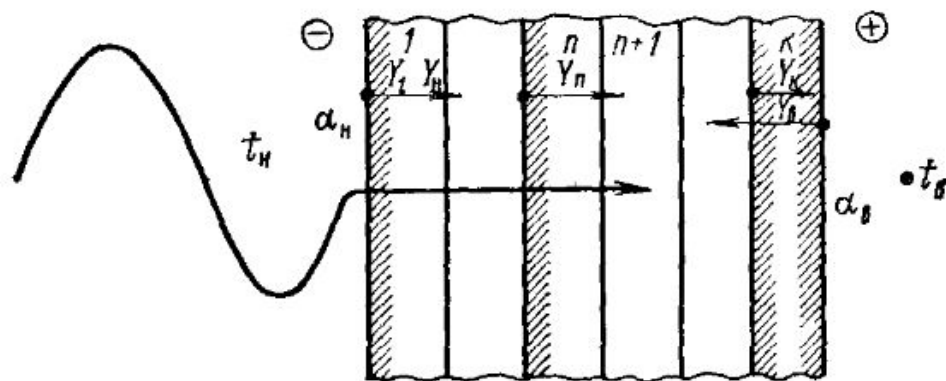


Таким образом, в толще ограждения образуется температурная волна, затухающая по мере проникания ее в толщу ограждения. Расстояние между двумя максимумами или двумя минимумами волны l носит название длины волны. Для характеристики числа волн, располагающихся в толще данного ограждения, может служить величина 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 γ 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} , °C, 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, °C, принимаемая согласно СНиП 23-01.

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

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

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/(м²·°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/(м²·°C), определяемые согласно 11.1.6;

α_{int} - то же, что и в формуле (8);