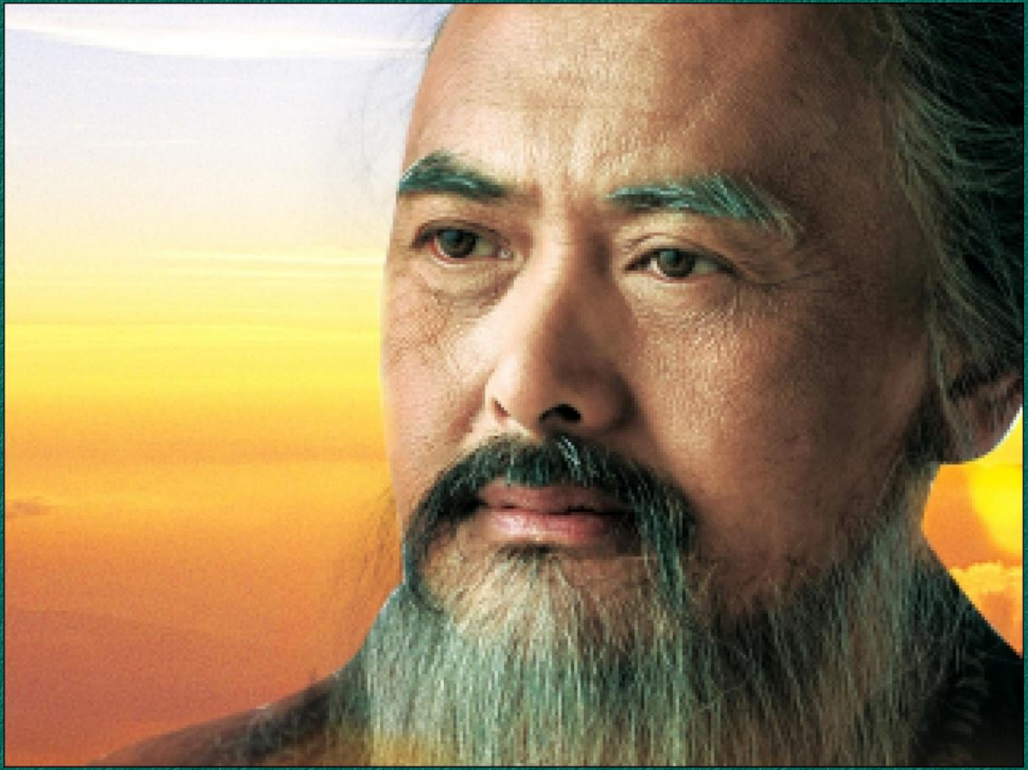
ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ

Кафедра «Самолетостроение»"

Ульяновск 2017/18 уч. год



Древний мыслитель и философ Китая. Его учение оказало глубокое влияние на жизнь Китая и Восточной Азии, став основой философской системы, известной как конфуцианство.
(551 - 479 г. до н.э.)

Того, кто не задумывается
о далеких трудностях,
поджидают близкие неприятности

Конфуций

Лекция
по дисциплине

«Термодинамика и теплопередача»

«Основные положения теплопроводности»

Демонстрируется видеоролик «Теплопроводность стройматериалов» - 2 мин.

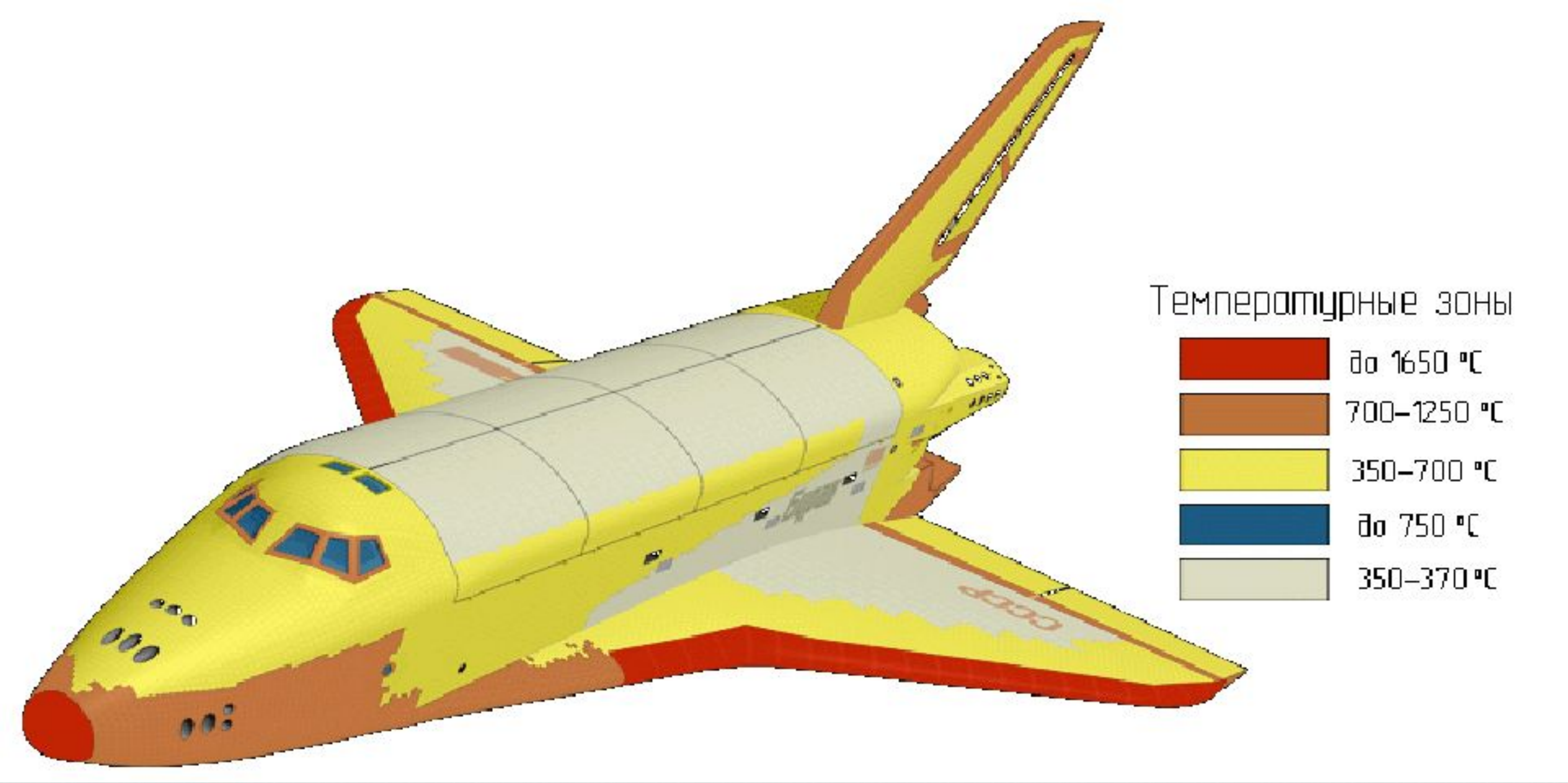
1. Температурное поле

Изотропным называют тело, обладающее одинаковыми физическими свойствами по всем направлениям. При нагреве такого тела температура его в различных точках изменяется во времени и теплота распространяется от мест с более высокой температурой к местам с более низкой температурой. Из этого следует, что в общем случае процесс передачи теплоты теплопроводностью в твердом теле сопровождается изменением температуры t как в пространстве, так и во времени:

$$t = f(x, y, z, \tau), \tag{22-1}$$

где x, y, z — координаты точки; τ — время.

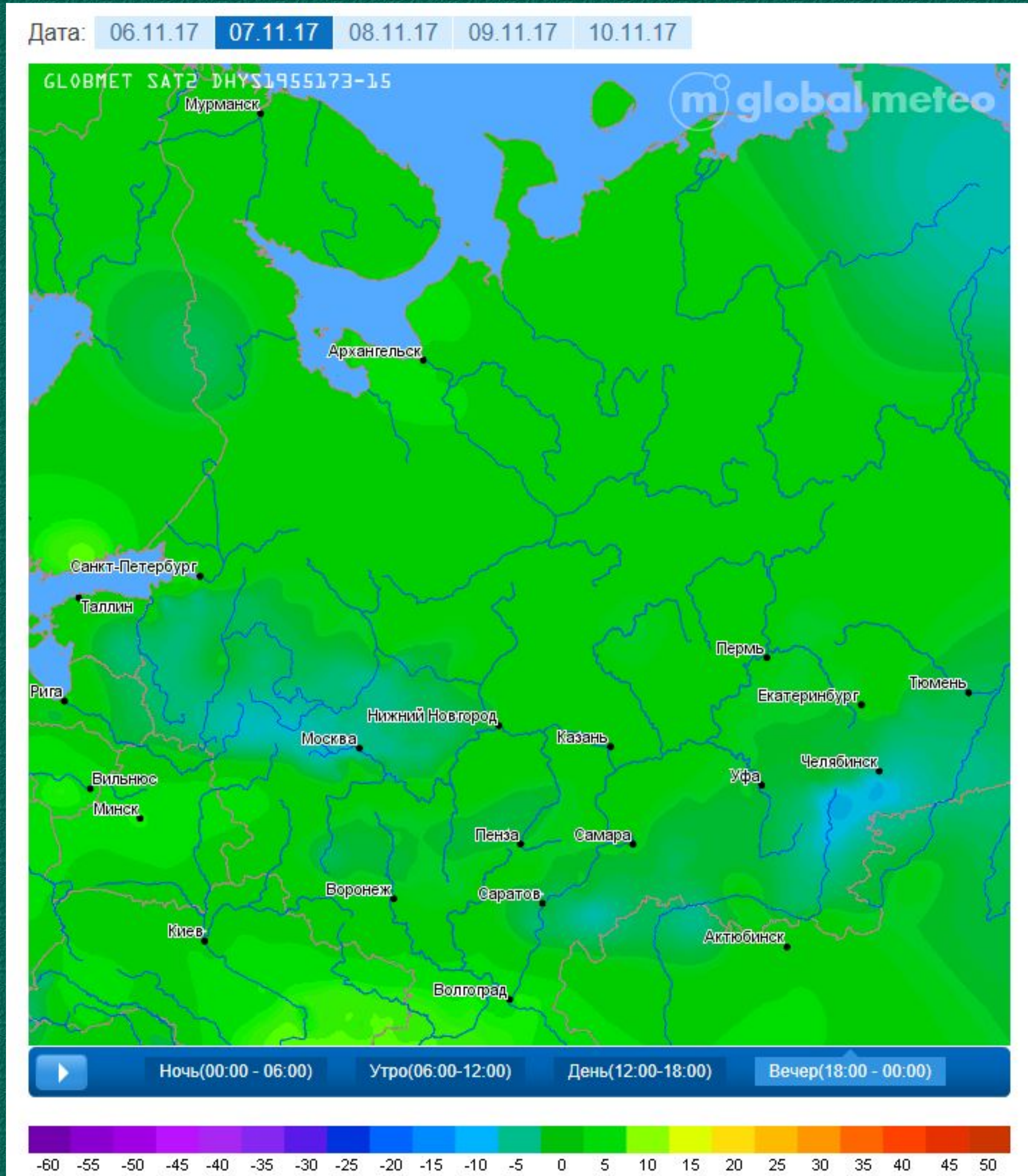
В математической физике *температурным полем* называют совокупность значений температуры в данный момент времени для всех точек изучаемого пространства, в котором протекает процесс.



На практике встречаются задачи, когда температура тела является функцией одной координаты, тогда уравнение одномерного температурного поля для режима:

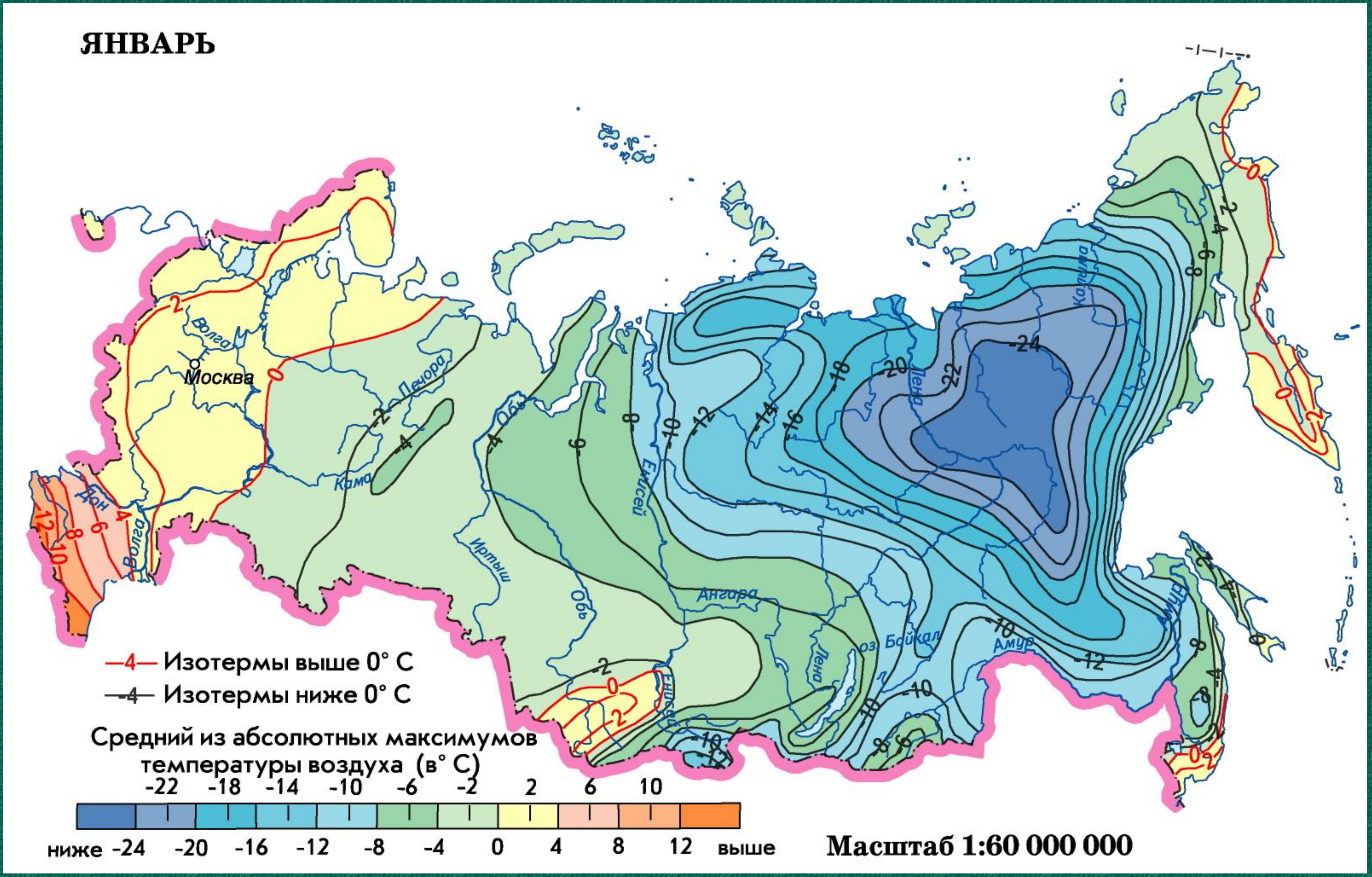
стационарного

$$t = f(x);\ \partial t/\partial \tau = 0 \text{ и } \partial t/\partial y = \partial t/\partial z = 0;$$


Дата: 06.11.17 07.11.17 08.11.17 09.11.17 10.11.17
GLOBMET SAT2 DHYS1955173-15
global meteo
Мурманск
Архангельск
Санкт-Петербург
Таллин
Рига
Пермь
Тюмень
Екатеринбург
Нижний Новгород
Москва
Казань
Челябинск
Уфа
Вильнюс
Минск
Пенза
Самара
Воронеж
Саратов
Киев
Актюбинск
Волгоград
Ночь(00:00 - 06:00)
Утро(06:00-12:00)
День(12:00-18:00)
Вечер(18:00 - 00:00)
-60 -55 -50 -45 -40 -35 -30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50

2. Градиент температуры

Средняя температура воздуха за январь



Если соединить точки тела с одинаковой температурой, то получим поверхность равных температур, называемую *изотермной*. Изотермные поверхности между собой никогда не пересекаются. Они либо замыкаются на себя, либо кончаются на границах тела.

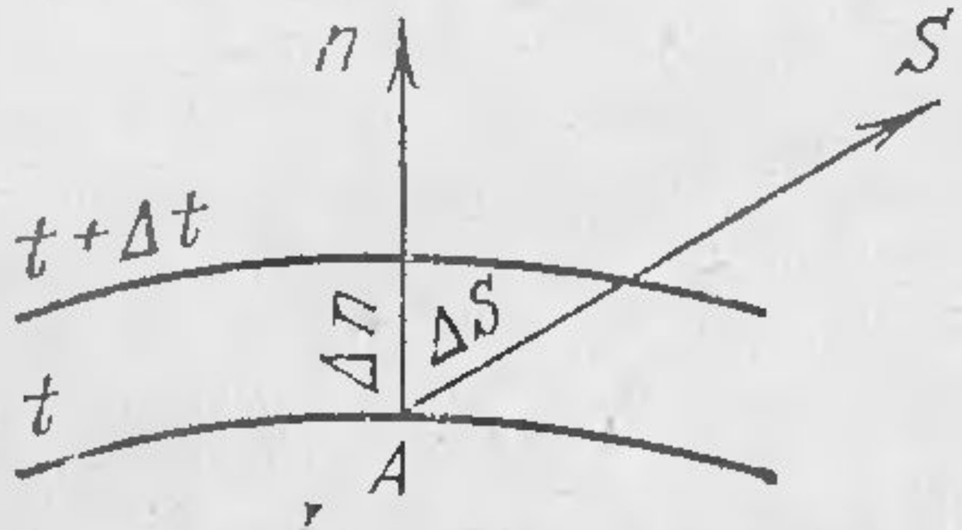


Рис. 22-1

$$\operatorname{grad} t = \lim |\Delta t/\Delta n|_{\Delta n \to 0} = \partial t/\partial n. \qquad (22\text{-}5)$$

Градиент температуры есть вектор, направленный по нормали к изотермной поверхности в сторону возрастания температуры и численно равный частной производной от температуры по этому направлению. За положительное направление градиента принимается направление возрастания температур.

3. Основной закон теплопроводности

Для распространения теплоты в любом теле или пространстве необходимо наличие разности температур в различных точках тела. Это условие относится и к передаче теплоты теплопроводностью, при которой градиент температуры в различных точках тела не должен быть равен нулю.

Связь между количеством теплоты dQ в *дж*, проходящим через элементарную площадку dF, расположенную на изотермной поверхности, за промежуток времени $d\tau$ и градиентом температуры устанавливается гипотезой Фурье, согласно которой

$$dQ = -\lambda dF \operatorname{grad} t \, d\tau = -\lambda dF d\tau \, (\partial t/\partial n). \qquad (22\text{-}6)$$

Минус в правой части показывает, что в направлении теплового потока температура убывает и величина grad t является величиной отрицательной. Множитель пропорциональности λ называют *коэффициентом теплопроводности*. Уравнение (22-6) носит название основного уравнения теплопроводности, или закона Фурье. Справедливость гипотезы Фурье подтверждается опытами.

Количество теплоты, проходящей через единицу изотермной поверхности в единицу времени, называют *плотностью теплового потока*, или *вектором плотности теплового потока*, имеющим размерность $[вт/м^2]$

$$q = -dQ/(dF d\tau), \text{ или } q = -\lambda\,(\partial t/\partial n). \qquad (22\text{-}7)$$

Вектор плотности теплового потока направлен по нормали к изотермной поверхности в сторону убывания температуры. Векторы q и grad t лежат на одной прямой, но направлены в противоположные стороны.

Количество теплоты, прошедшей в единицу времени через произвольную поверхность F, называют *тепловым потоком*, имеющим размерность $[вт]$

$$Q = \int_F q\,dF = -\int_F \lambda\,dF\,(\partial t/\partial n). \qquad (22\text{-}8)$$

4. Коэффициент теплопроводности

Коэффициент теплопроводности λ есть физический параметр вещества, характеризующий его способность проводить теплоту. Размерность коэффициента теплопроводности определяется из уравнения (22-8):

$$\lambda = -\frac{Q}{F\,(\partial t/\partial n)}\,.$$

Размерность $\lambda - \dfrac{вт}{м^2 \cdot град/м} = вт/(м \cdot град)$.

Как показывают опыты, для многих материалов зависимость коэффициента теплопроводности от температуры может быть принята линейной:

$$\lambda = \lambda_0\,[1 + b\,(t - t_0)],$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности при температуре t_0, °С; t — температура, °С; b — температурный коэффициент, определяемый опытным путем.

Числовые значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности при различных плотностях, температурах и теплоемкостях для расчетов берутся из справочных таблиц (табл. 22-1).

Таблица 22-1

Наименование материала	ρ, $кг/м^3$	t, °C	λ, вт/(м×град)	c, кдж/(кг·град)	$a \cdot 10^6$, $м^2/сек$
Асбест листовой	770	30	0,1163	0,816	0,186
Асфальт	2110	20	0,6978	2,09	0,156
Бетон	2300	20	0,279	1,13	0,622
Глина огнеупорная	1850	450	1,035	1,089	0,051
Дуб (поперек волокон)	800	20	0,207	1,758	0,147
Земля влажная	1700	17	0,657	2,01	0,192
Каменный уголь	1400	20	0,186	1,31	0,103
Кирпич красный	1800	0	0,768	0,879	—
Кирпич огнеупорный	1900	0	0,814	0,837	0,514
Лед	920	0	2,25	2,26	1,08
Минеральная вата	200	50	0,0465	0,921	0,253
Накипь котельная	1000÷÷2500	100	1,314÷÷3,14	—	—
Песок сухой	1500	20	0,326	0,795	2,74
Пробковая пластина	200	27	0,0419	1,884	0,117
Резина твердая	1200	0	0,169	1,382	0,098
Сахарный песок	1600	0	0,582	1,256	0,278
Слюда	290	20	0,582	0,879	2,28
Снег	560	—	0,465	2,09	0,4
Стекло	2500	20	0,744	0,67	0,444
Стеклянная вата	200	0	0,037	0,67	0,278
Шлак котельный	1000	0	0,29	0,754	—
Шлаковая вата	250	100	0,0698	—	—
Штукатурка известковая	1600	0	0,698	0,837	—
Алюминий	2670	0	204	0,921	86,7
Латунь	8600	0	85	0,377	33,8
Медь	8800	0	384	0,381	112,5
Никель	9000	20	58	0,461	17,8

5. Дифференциальное уравнение теплопроводности

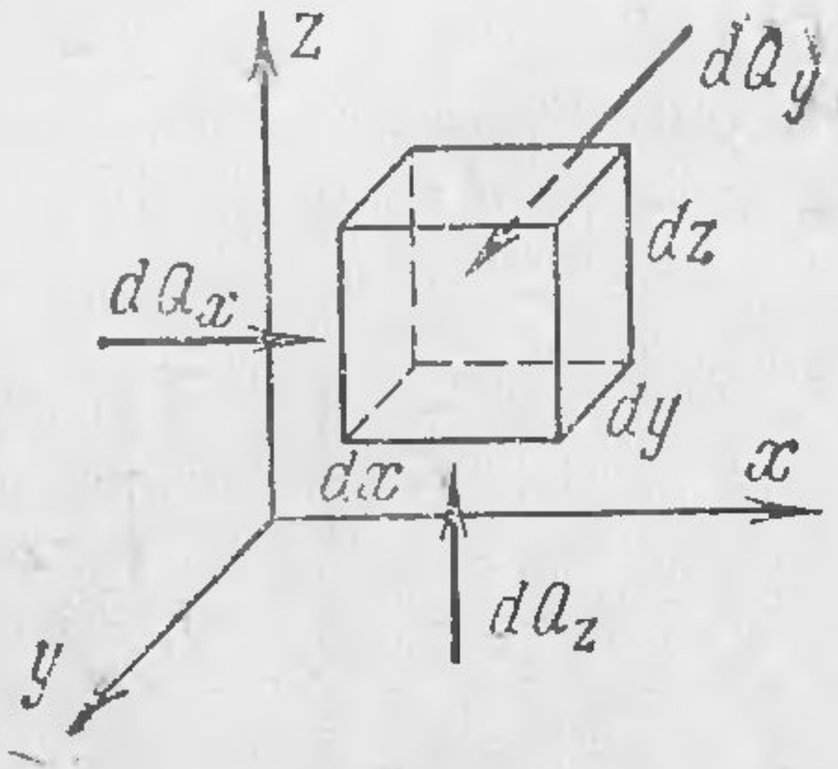


Рис. 22-2

Через площадку $dx \cdot dy$ за время $d\tau$, согласно уравнению Фурье, проходит следующее количество теплоты:

$$dQ_{z1} = -\lambda dx \cdot dy d\tau \; (\partial t/\partial z)$$

(grad t взят в виде частной производной, так как предполагается зависимость температуры не только от x, но и от других координат и времени).

Через противоположную грань на расстоянии dz отводится количество теплоты, определяемое из выражения

$$dQ_{z2} = -\lambda \, dx \cdot dy \, d\tau \frac{\partial}{\partial z} \left(t + \frac{\partial t}{\partial z} \;\; dz \right),$$

где $t + \frac{dt}{dz} \; dz$ — температура второй грани, а величина $\frac{dt}{dz} dz$ определяет изменение температуры в направлении z.

Полное приращение внутренней энергии в параллелепипеде равно

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = \lambda dx \cdot dy \cdot dz\, d\tau \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \qquad \text{(a)}$$

Величину $\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ называют *оператором Лапласа* и обычно обозначают сокращенно ∇^2 (знак ∇ читается «набла»); величину $\frac{\lambda}{c\rho}$ называют *коэффициентом температуропроводности* и обозначают буквой a. При указанных обозначениях дифференциальное уравнение теплопроводности принимает вид

$$\partial t/\partial \tau = a\, \nabla^2 t. \qquad (22\text{-}10)$$

Уравнение (22-10) называется *дифференциальным уравнением теплопроводности*, или уравнением Фурье, для трехмерного нестационарного температурного поля при отсутствии внутренних источников теплоты. Оно является основным при изучении вопросов нагревания и охлаждения тел в процессе передачи теплоты теплопроводностью и устанавливает связь между временны́м и пространственным изменениями температуры в любой точке поля.

6. Теплопроводность через однослойную стенку

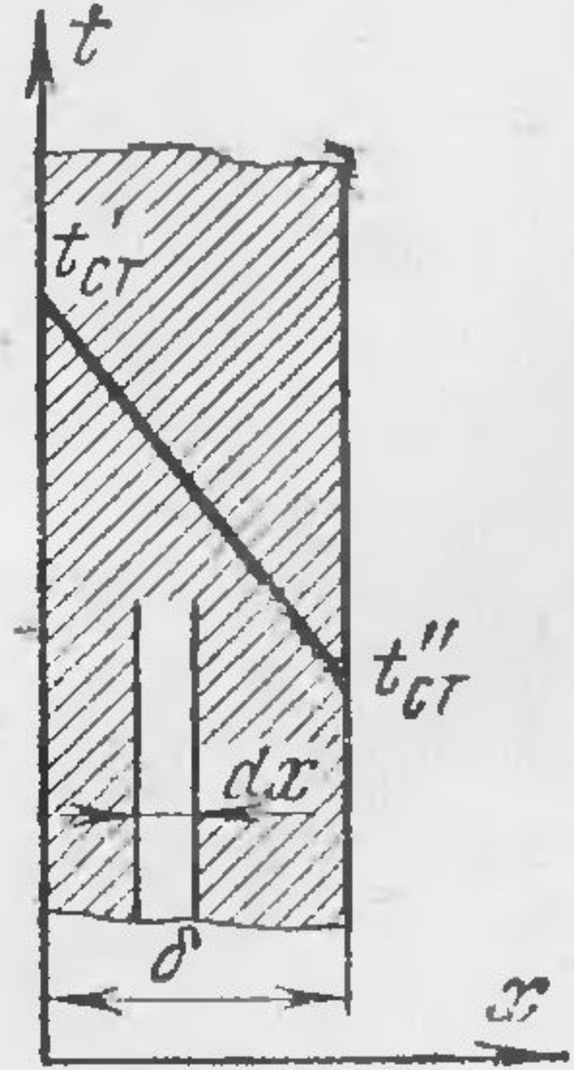


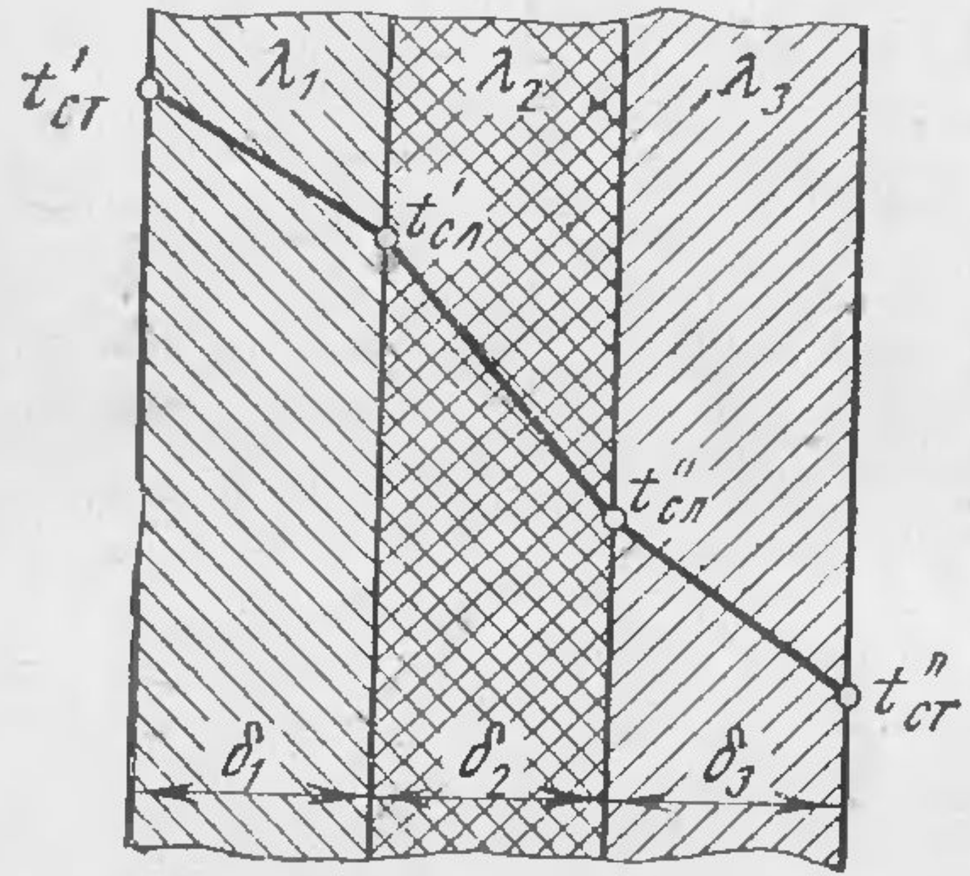
Рис. 23-1

Зная удельный тепловой поток, можно вычислить общее количество теплоты, которое передается через поверхность стенки F за время τ

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F (t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}}) \tau. \qquad (23\text{-}3)$$

Количество теплоты, передаваемое теплопроводностью через плоскую стенку, прямо пропорционально коэффициенту теплопроводности стенки λ ее площади F, промежутку времени τ, разности температур на наружных поверхностях стенки $(t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}})$ и обратно пропорционально толщине стенки δ. Тепловой поток зависит не от абсолютного значения температур, а от их разности $t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}} = \Delta t$, называемой *температурным напором*.

7. Теплопроводность через многослойную стенку



$t'_{ст}$
λ_1
λ_2
λ_3
$t'_{сл}$
$t''_{сл}$
$t''_{ст}$
δ_1
δ_2
δ_3

Рис. 23-2

Тепловой поток для каждого слоя:

$$Q=\frac{\lambda_1}{\delta_1}F\left(t'_{\text{ст}}-t'_{\text{сл}}\right); \quad Q=\frac{\lambda_2}{\delta_2}F\left(t'_{\text{сл}}-t''_{\text{сл}}\right);$$

$$Q=\frac{\lambda_3}{\delta_3}F\left(t''_{\text{сл}}-t''_{\text{ст}}\right).$$

Решая эти уравнения относительно разности температур и складывая, получаем:

$$Q=\left[F\left(t'_{\text{ст}}-t''_{\text{ст}}\right)\right]\Bigg/\sum_{i=1}^{i=n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}. \tag{23-9}$$

Отношение $\frac{\delta}{\lambda}$ называют *термическим сопротивлением слоя*, а величину $\sum\limits_{i=1}^{i=n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}$ — *полным термическим сопротивлением* многослойной плоской стенки.

Температуры в °C между отдельными слоями сложной стенки равны:

$$\left.\begin{aligned} t'_{сл} &= t'_{ст} - \frac{Q}{F}\,\frac{\delta_1}{\lambda_1};\\ t''_{сл} &= t'_{сл} - \frac{Q}{F}\,\frac{\delta_2}{\lambda_2};\\ t'''_{сл} &= t''_{сл} - \frac{Q}{F}\,\frac{\delta_3}{\lambda_3} \quad \text{и т. д.} \end{aligned}\right\} \qquad (23\text{-}12)$$

Температура в каждом слое стенки при постоянном коэффициенте теплопроводности изменяется по линейному закону, а для многослойной плоской стенки температурный график представляет собой ломаную линию.

8. Теплопроводность через однослойную цилиндрическую стенку

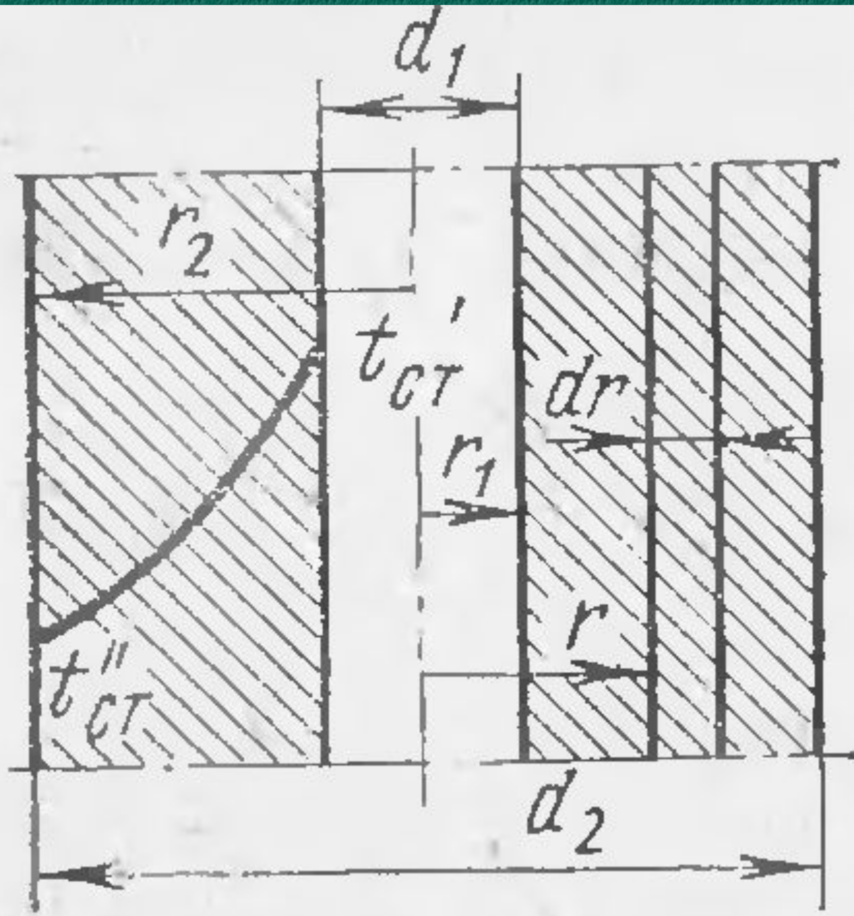


Рис. 23-3

Тепловой поток может быть отнесен к единице длины трубы q_l и к 1 $м^2$ внутренней или внешней поверхности q_1 и q_2. Тогда расчетные формулы принимают вид:

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{2\pi\lambda(t'_{ст} - t''_{ст})}{\ln d_2/d_1}; \quad (23\text{-}14)$$

$$q_1 = \frac{Q}{\pi d_1 l} = \frac{2\lambda(t'_{ст} - t''_{ст})}{d_1 \ln d_2/d_1}; \quad (23\text{-}15)$$

$$q_2 = \frac{Q}{\pi d_2 l} = \frac{2\lambda(t'_{ст} - t''_{ст})}{d_2 \ln d_1/d_2}. \quad (23\text{-}16)$$

Задание на самостоятельную работу

1. Повторить материал по конспекту.
2. По учебнику проработать материал на стр. 299-312.
3. Знать основные термины и определения термодинамики. Планируется автоматизированный опрос.

Литература: В.В Нащокин. Техническая термодинамика и теплопередача. – М. Высшая школа, 1975 – 496 с.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ