Рейтинг	Оценка на экзамене, дифференцированном зачёте	Оценка на зачете
85 – 100	отлично	зачтено
71 - 84	хорошо	зачтено
60 – 70	удовлетворительно	зачтено
0-59	неудовлетворительно	не зачтено

	Максимальные баллы
РК1	20
РК2	20
ДЗ	40
Наличие конспекта + посещения	20

Студент выполняет домашнее задание, которое носит обзорно-аналитический характер и предполагает подробное изучение установок, стендов, средств воспроизведения теплового нагружения и средств диагностики. Тема работы индивидуальна и согласовывается с преподавателем.

Примеры тем домашних заданий:

1. Стенд для газодинамических испытаний головных частей ракет и космических аппаратов.
2. Стенд для термовакуумных испытаний космических аппаратов.
3. Стенд для циклических тепловых испытаний плиточной тепловой защиты.
4. Стенд для термосиловых испытаний конструкций планера гиперзвуковых летательных аппаратов.
5. Стенд для испытаний элементов остекления воздушно-космического самолета.
6. Установка для определения излучательной способности электропроводных материалов.
7. Установка для определения отражательной способности материалов и покрытий.
8. Установка для измерения излучательной способности частично прозрачных материалов.
9. Установка для определения теплопроводности теплоизоляционных материалов.
10. Установка для комплексного определения теплофизических свойств материалов.
11. Прибор для измерения коэффициента линейного термического расширения.
12. Болометры.
13. Термопары (конкретизируется).
14. Датчики теплового потока (конкретизируется).
15. Термопреобразователи сопротивления.
16. Пирометры без модуляции потока излучения.
17. Пирометры с модуляцией потока излучения.
18. Тепловизоры (конкретизируется).
19. Датчики на облученных кристаллах.
20. Оптоволоконные датчики.

Модуль 2. Методы и средства воспроизведения тепловых нагрузок и измерения при тепловых испытаниях

Лекция 5. Воздействия на современные объекты ракетно-космической техники**.**

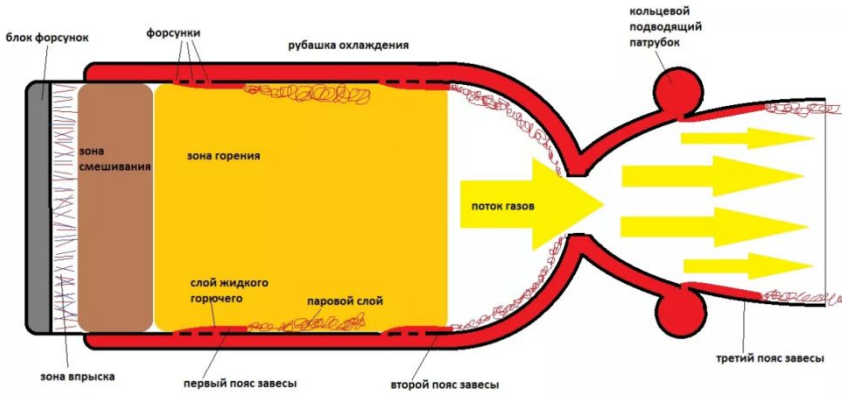
Тепловые нагрузки. Физическая природа тепловых нагрузок: радиационный теплообмен, конвективный теплообмен, комбинированное воздействие.

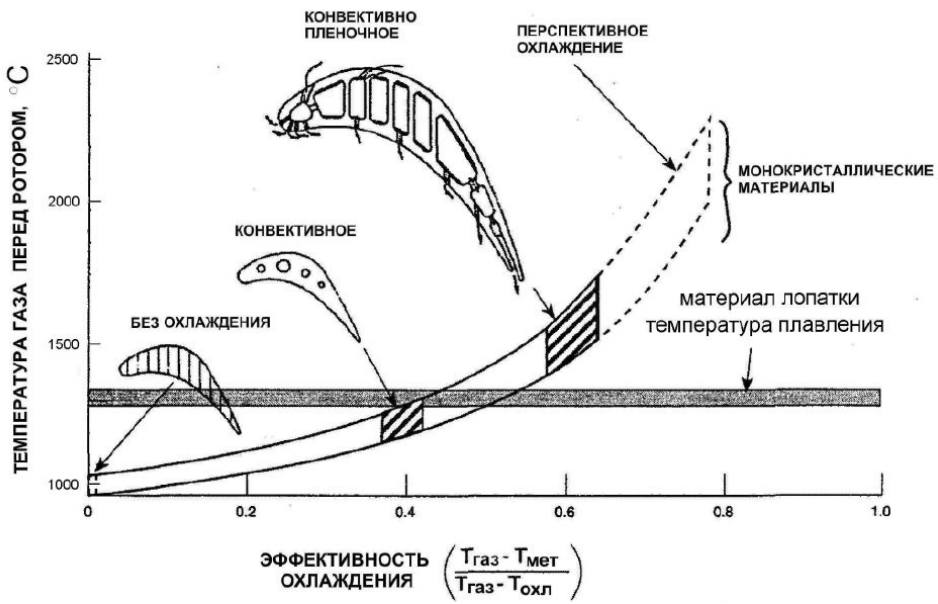
Классификация теплонагруженных систем

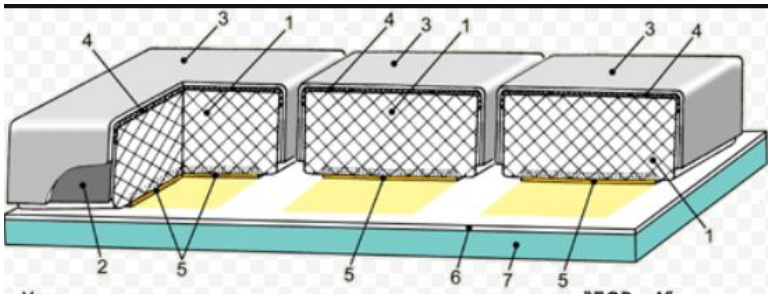
1) *Теплопреобразующие* ***активны***

2) *Теплозащитные* ***пассивн***

3) *Силовые*







Установка теплозащиты на поворотных консолях крыла "БОРа-4".
На обшивке условным цветом показаны зоны нанесения клея:
1 - кварцевая плитка; 2 - боковое эрозионностойкое покрытие; 3 - лаковое покрытие;
4 - внешнее эрозионностойкое покрытие; 5 - клеевой слой; 6 - металлическая обшивка;
7 - охлаждаемый водой фетр

Особенности тепловых режимов в ракетно-космической технике (см. Лекцию 1)

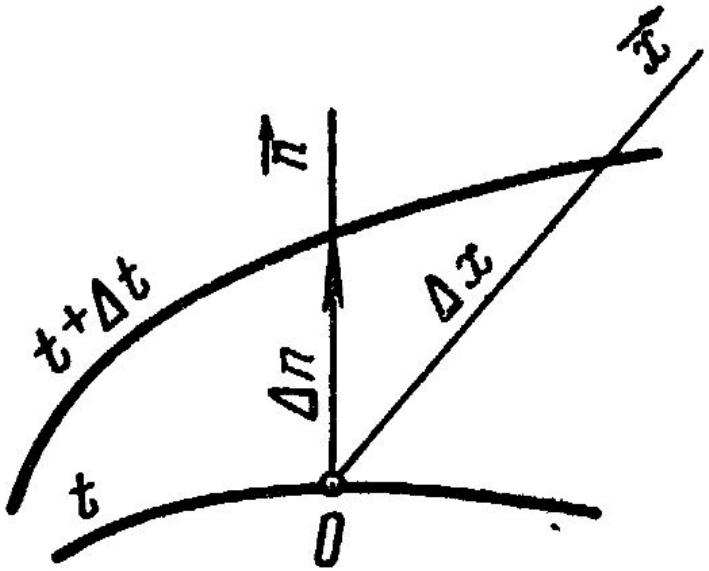
ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

Излучение Солнца → Космические системы на орбите Земли, солнечные парусные системы

Конвективный теплообмен → Двигатели, головные части, ТЗП ВКС

Излучение + конвективный теплообмен → ТЗП межорбитальных транспортных аппаратов

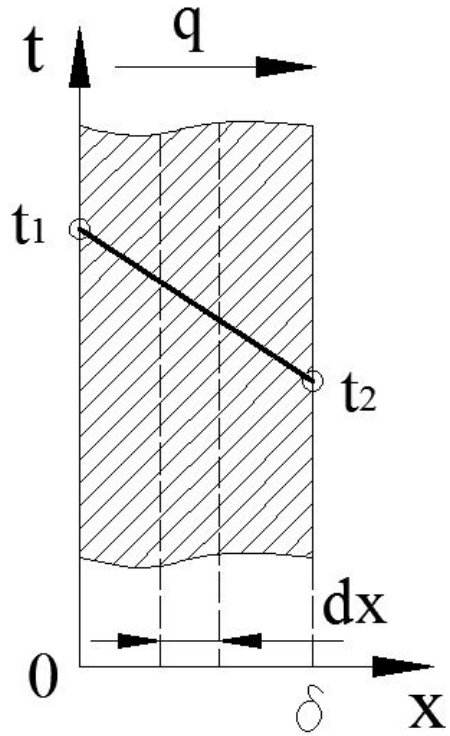
Теплопроводность



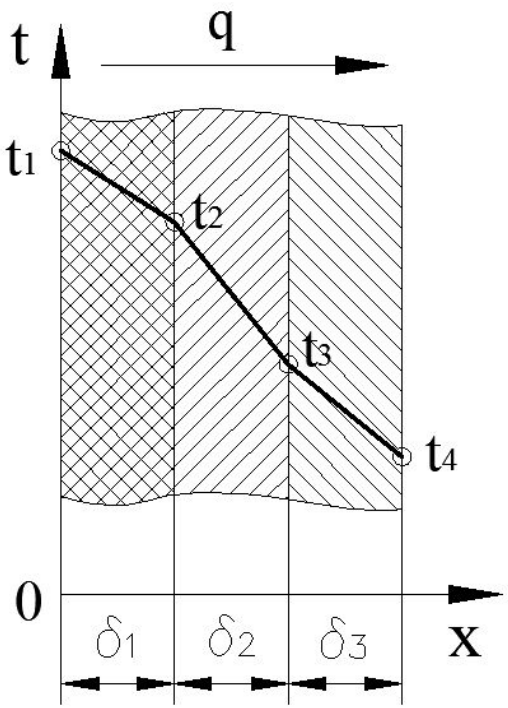
$$T = f(x, y, z, \tau)$$

$$\lim(\Delta T / \Delta n)_{\Delta n \to 0} = \partial T / \partial n = grad\ T = \nabla T$$

$$\vec{q} = -\lambda\ grad\ T$$



Однородная плоская стенка



Многослойная плоская стенка

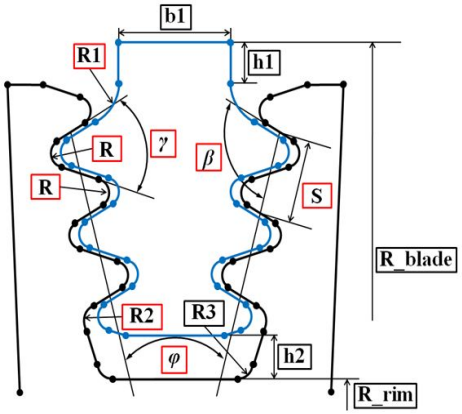
$$q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \to t = -\frac{q}{\lambda} \cdot x + C$$

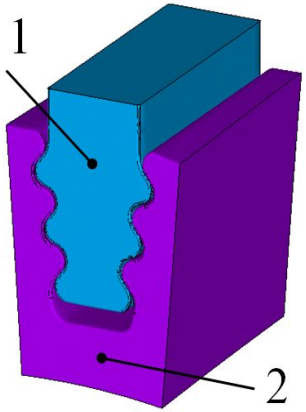
$$ГУ: x = 0, t = t_1 = C; x = \delta, t = t_2$$

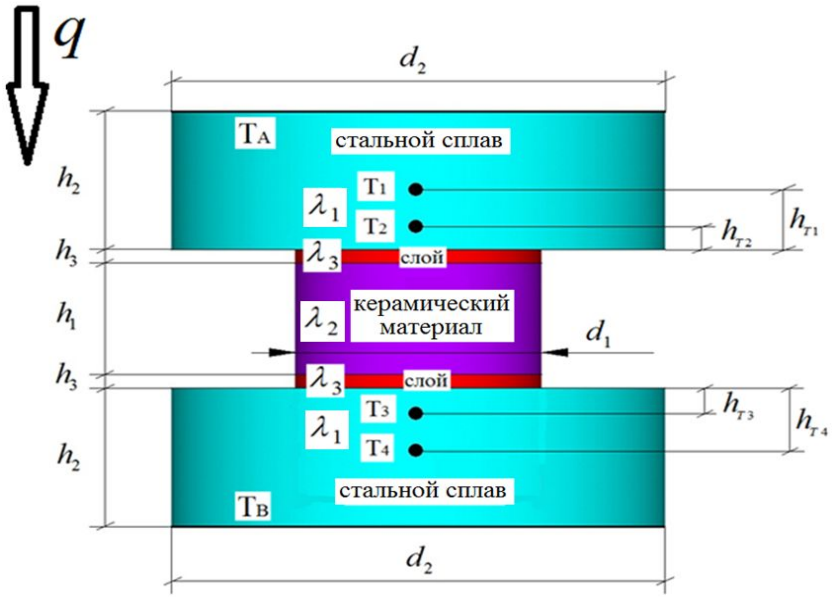
$$t_2 = -\frac{q}{\lambda} \cdot \delta + t_1 \to q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2) = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t$$

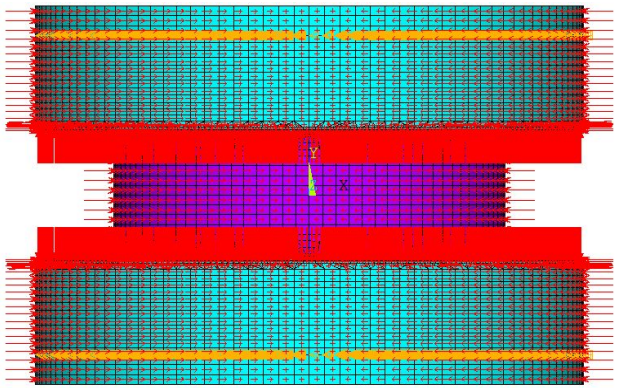
$$\left.\begin{aligned} q &= \frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot (t_1 - t_2) \\ q &= \frac{\lambda_2}{\delta_2} \cdot (t_2 - t_3) \\ q &= \frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot (t_3 - t_4) \end{aligned}\right\} \to \left.\begin{aligned} t_1 - t_2 &= q \cdot \frac{\lambda_1}{\delta_1} \\ t_2 - t_3 &= q \cdot \frac{\lambda_2}{\delta_2} \\ t_3 - t_4 &= q \cdot \frac{\lambda_3}{\delta_3} \end{aligned}\right\} \to q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}$$

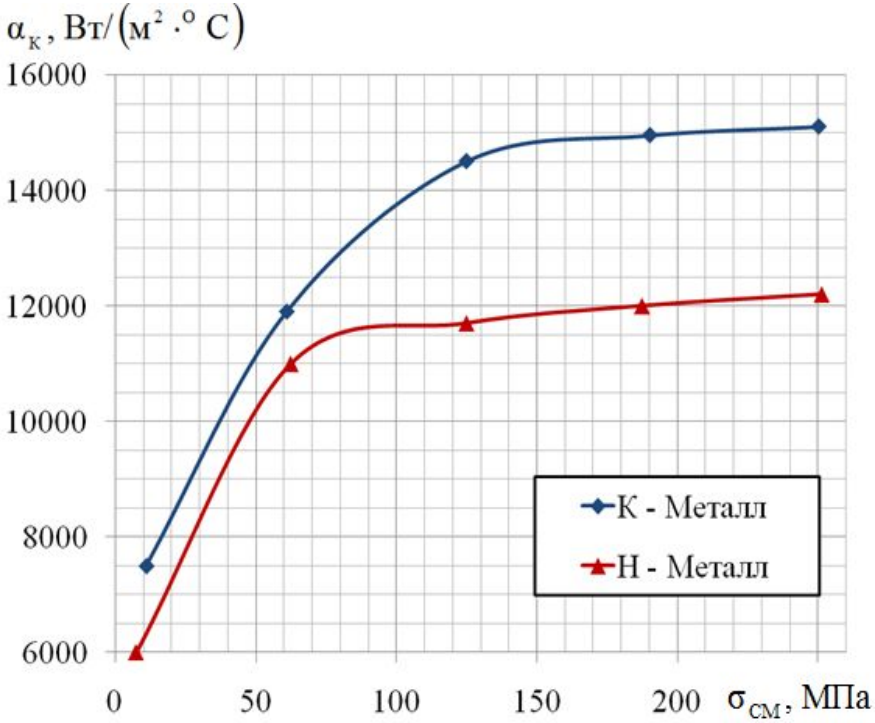
$\alpha_K = \lambda / \delta$ - Тепловая проводимость контакта, Вт/(С·м^2)

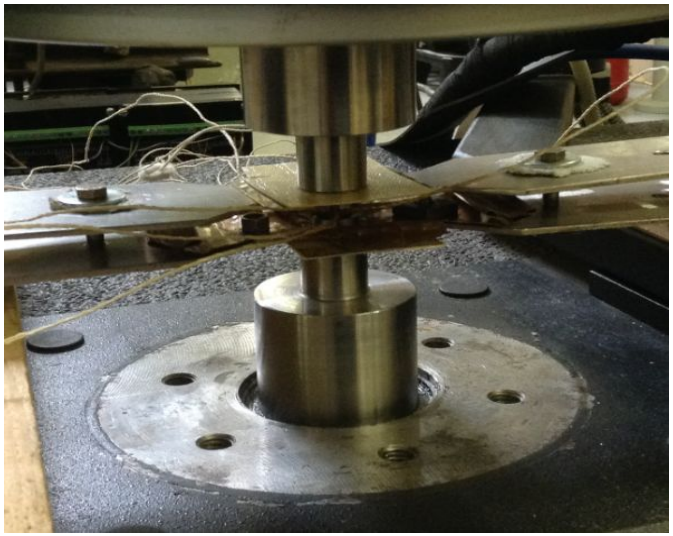

b1
R1
h1
R
R
γ
β
S
R_blade
R2
R3
φ
h2
R_rim


1
2


q
d2
TA
стальной сплав
h2
T1
λ1
T2
hT1
hT2
h3
λ3
слой
h1
λ2
керамический материал
d1
h3
λ3
слой
hT3
hT4
T3
λ1
T4
h2
стальной сплав
TB
d2




αK, Вт/(м2 ·° С)
16000
14000
12000
10000
8000
6000
0
50
100
150
200
σСМ, МПа
К - Металл
Н - Металл

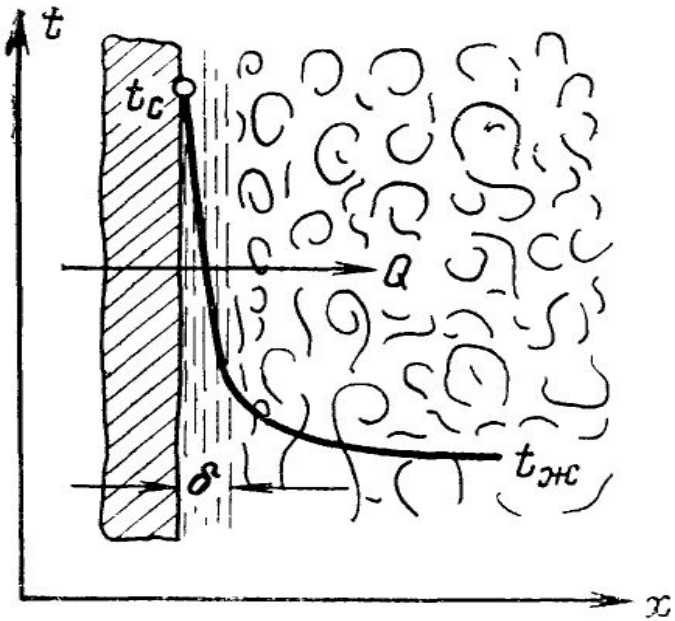


Конвективный теплообмен

Формула Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha \cdot (t_c - t_{ж}) F$$

где α – коэффициент теплоотдачи; t_c – температура стенки; $t_ж$ – температура жидкости; F – площадь поверхности теплообмена.

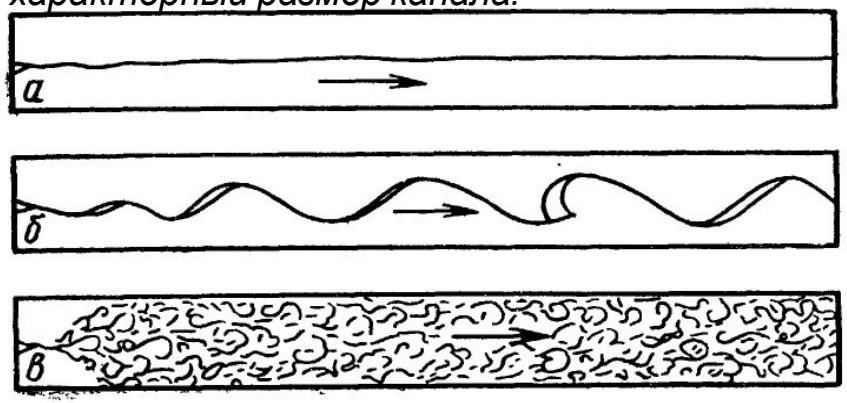


Удельная теплоемкость при постоянном давлении c_p (изобарная), а при постоянном объеме – c_v (изохорная).

Критерий перехода ламинарного течения в турбулентное:

$$\mathrm{Re} = \omega\, l / \nu > x$$

где w – скорость движения жидкости; l – характерный размер канала; стенки; l – характерный размер канала.



Характер движения жидкости/газа в трубе при а – ламинарном, б – переходном, в – турбулентном режимах

$a = \lambda / c\rho$ *- коэффициент температуропроводности*

m – *динамический коэффициент вязкости. Выражает собой силу трения, приходящуюся на единицу поверхности соприкосновения двух жидких слоев.*

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ *– кинематический коэффициент вязкости.*

$\beta = \frac{1}{v}\frac{\partial v}{\partial T}$ *– температурный коэффициент объемного расширения.*

v – удельный объем, м³/кг

Система ДУ для описания теплопередачи

а) Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье-Кирхгофа

$$\frac{\partial t}{d\tau}+\omega_X\frac{\partial t}{\partial x}+\omega_Y\frac{\partial t}{\partial y}+\omega_Z\frac{\partial t}{\partial z}=a\cdot\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right)$$

- для твердых тел:

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

б) Дифференциальные уравнения несжимаемой вязкой жидкости – Навье-Стокса

$$\rho\frac{\partial w_X}{\partial\tau}+\rho\left(w_X\frac{\partial w_X}{\partial x}+w_Y\frac{\partial w_X}{\partial y}+w_Z\frac{\partial w_X}{\partial z}\right)=\rho g_X-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 w_X}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w_X}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w_X}{\partial z^2}\right)$$

$$\rho\frac{\partial w_Y}{\partial\tau}+\rho\left(w_X\frac{\partial w_Y}{\partial x}+w_Y\frac{\partial w_Y}{\partial y}+w_Z\frac{\partial w_Y}{\partial z}\right)=\rho g_Y-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 w_Y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w_Y}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w_Y}{\partial z^2}\right)$$

$$\rho\frac{\partial w_Z}{\partial\tau}+\rho\left(w_X\frac{\partial w_Z}{\partial x}+w_Y\frac{\partial w_Z}{\partial y}+w_Z\frac{\partial w_Z}{\partial z}\right)=\rho g_Z-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 w_Z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w_Z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w_Z}{\partial z^2}\right)$$

б) Уравнение сплошности

$$\frac{\partial\rho}{\partial\tau}+\frac{\partial(\rho\omega_X)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho\omega_Y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho\omega_Z)}{\partial z}=0$$

- для несжимаемых жидкостей:

$$\frac{\partial\omega_X}{\partial x}+\frac{\partial\omega_Y}{\partial y}+\frac{\partial\omega_Z}{\partial z}=0$$

Математическое описание

1) Геометрические условия (форма, размеры системы)

2) Физические условия (свойства среды)

3) Граничные и временные условия

В одномерном по пространству случае однородное (без источников энергии) уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, 0 < x < l, \tau > 0.$$

Первая начально-краевая задача:

Если на границах *x*=0 и *x*=*l* заданы значения искомой функции *t*(*x*,*tau*) + начальные условия:

$$t(0,\tau) = \varphi_1(\tau), x = 0, \tau > 0, \qquad t(l,\tau) = \varphi_2(\tau), x = l, \tau > 0, \qquad t(x,0) = \psi(x), 0 \le x \le l, \tau = 0,$$

Вторая начально-краевая задача:

$$\frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x} = \varphi_1(\tau), x = 0, \tau > 0. \qquad \frac{\partial t(l,\tau)}{\partial x} = \varphi_2(\tau), x = l, \tau > 0.$$

Третья начально-краевая задача:

$$\frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x} + \alpha \cdot t(0,\tau) = \varphi_1(\tau), x = 0, \tau > 0. \qquad \frac{\partial t(l,\tau)}{\partial x} + \beta \cdot t(l,\tau) = \varphi_2(\tau), x = l, \tau > 0.$$

Определение коэффициента теплоотдачи

Поток теплоты, передаваемый от жидкости к стенке, проходит через слой жидкости, прилегающей к поверхности, может быть определен по закону Фурье:

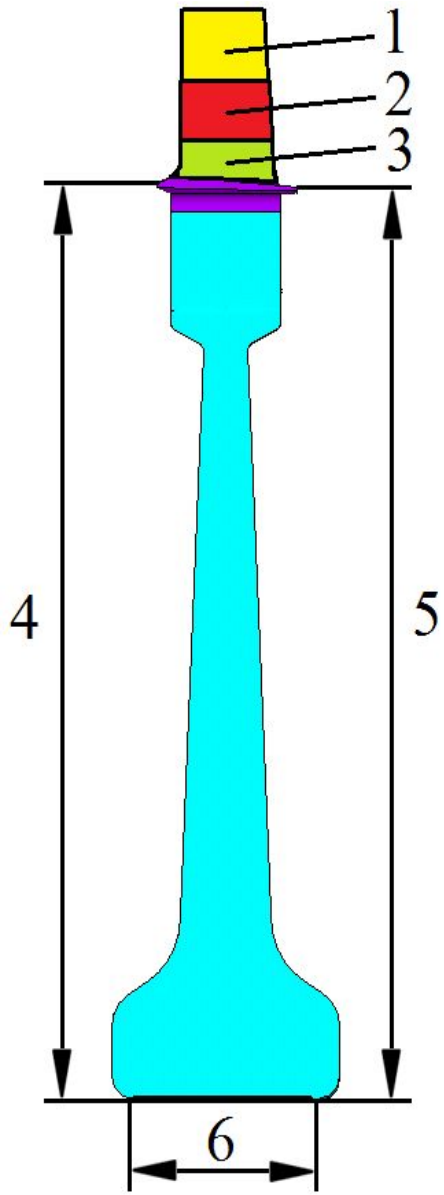
$$dQ = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n \to 0} dF.$$

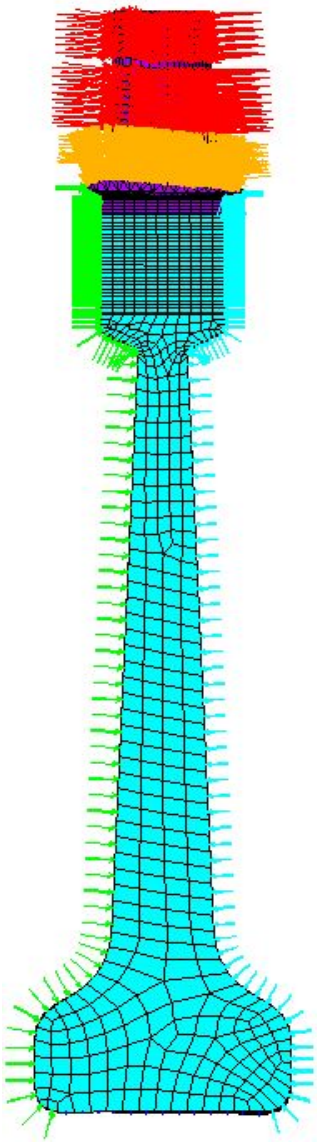
С другой стороны для этого же элемента поверхности применим закон Ньютона-Рихмана :

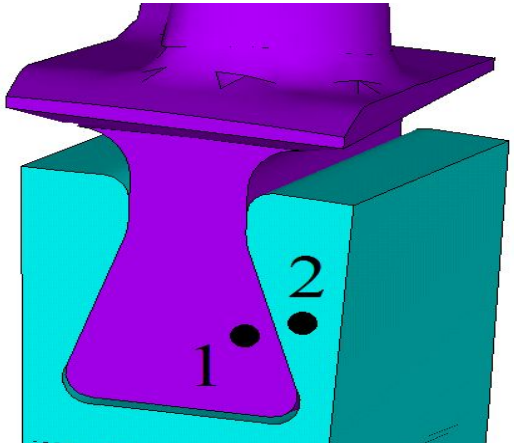
$$dQ = \alpha \left(t_c - t_{ж} \right) dF.$$

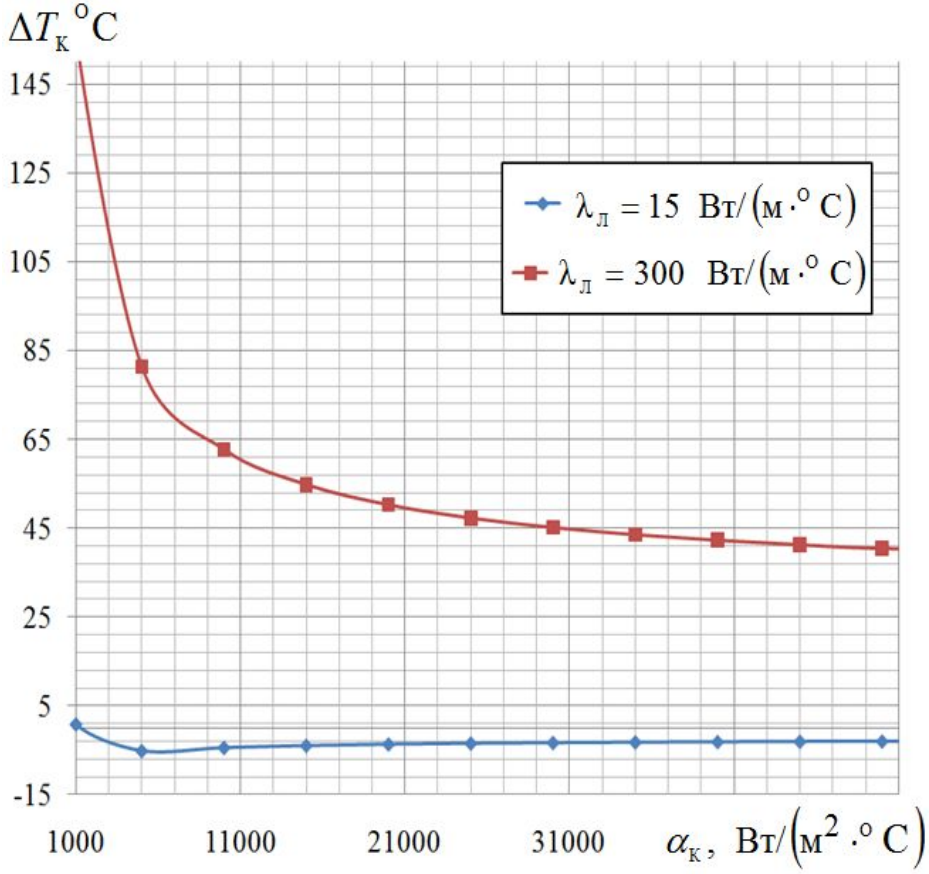
Приравнивая правые части этих уравнений, получаем уравнение теплоотдачи:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{t_c - t_{ж}} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n \to 0}.$$


1
2
3
4
5
6




1
2


$\Delta T_к$ °C
145
125
105
85
65
45
25
5
-15
1000
11000
21000
31000
$\alpha_к$, Вт/(м^2 ·° С)
$\lambda_л$ = 15 Вт/(м ·° С)
$\lambda_л$ = 300 Вт/(м ·° С)

Радиационный теплообмен

Длина волны	Вид излучения
$0{,}05\cdot10^{-6}$ мкм	Космическое
$(0{,}05\text{-}1)\cdot10^{-6}$ мкм	Гамма-излучение
$10^{-6}\text{-}20\cdot10^{-3}$ мкм	Рентгеновское
$20\cdot10^{-3}\text{-}0{,}4$ мкм	Ультрафиолетовое
0,4-0,8 мкм	Видимое
0,8 мкм - 0,8 мм	Тепловое (инфракрасное)
0,2 мм – Х мм	Радиоволны

$\lambda \cdot \nu = c$ (*)

где с – скорость распространения колебаний (в вакууме $c=3\cdot10^8$ м/с).

Закон Вина

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}\ мкм. \qquad \lambda > 0{,}5 мкм.$$

$E = dQ/dF$ – плотность потока излучения, Вт/м^2

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q_0$$

$$Q_A/Q_0 + Q_R/Q_0 + Q_D/Q_0 = 1$$

$$A + R + D = 0$$

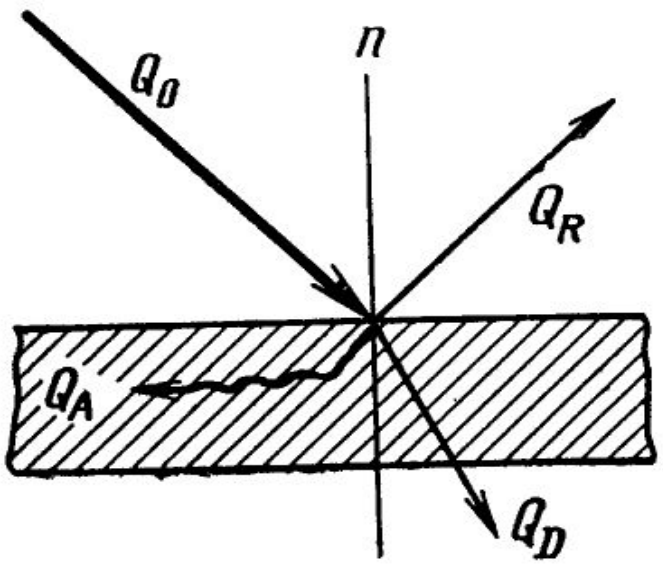


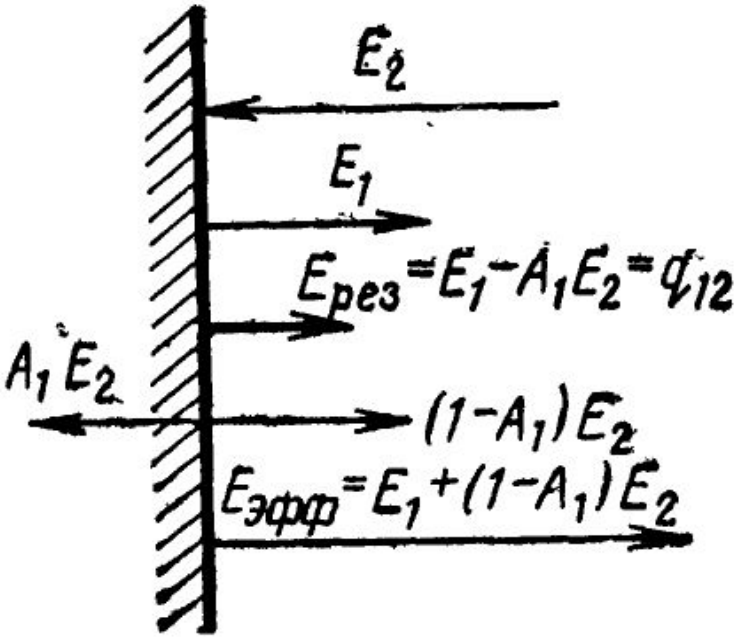
Схема распределения падающей лучистой энергии

A – поглощательная способность, R – отражательная способность, D – пропускательная способность

Если A=1, то R=0 и D=0 – вся падающая лучистая энергия полностью поглощается телом. Такие тела называются абсолютно черными.

Если R=1, то A=0 и D=0 – вся падающая лучистая энергия полностью отражается – зеркало.

Если D=1, то A=0 и R=0 – значит вся падающая лучистая энергия полностью проходит сквозь тело. Такие тела называются прозрачными.



К определению теплового излучения

Если на тело извне не падает никаких лучей, то с единицы поверхности тела отводится лучистый поток энергии E_1, Вт/м^2. Он полностью определяется температурой и физическими свойствами тела – это собственное излучение тела.

Со стороны других тел – падающее излучение E_2. Часть падающего излучения в количестве A_1E_2 поглощается телом – поглощенное излучение. Остальное в количестве $(1-A_1)E_2$ отражается – отраженное излучение.

Собственное излучение тела в сумме с отраженным называется эффективным излучением тела, $E_{эфф}=E_1+(1-A_1)E_2$. Это фактическое излучение тела, которое мы измеряем приборами, оно больше собственного на величину $(1-A_1)E_2$. $E_{эфф}$ зависит от физических свойств и температуры не только данного излучающего тела, но и других окружающих его тел, а также от формы, размеров и относительного расположения тел в пространстве.

Результирующее излучение $E_{рез}$ представляет собой разность между собственным излучением тела и той частью падающего внешнего излучения E_2, которая поглощается данным телом (A_1E_2):

$E_{рез}=E_1-A_1E_2$ – определяет поток энергии, который данное тело передает другим

Закон изменения спектральной плотности потока излучения от длины волны и температуры для абсолютно черного тела – закон Планка

$$E_{0\lambda}=\frac{c_1\cdot\lambda^{-5}}{e^{c2/\lambda T}-1}$$

где l – длина волны, м; T – абсолютная температура тела, К; $c_1=3{,}74\cdot10^{-16}$ Вт·м^2 и $c_2=1{,}44\cdot10^{-2}$ К·м – постоянные излучения.

Закон Стефана-Больцмана:

$$E_0=\sigma_0\cdot T^4 \qquad \sigma_0=5{,}67\cdot10^{-8}\ Вт/(м^2\cdot K^4) \qquad E_0=c_0\cdot\left(\frac{T}{100}\right)^4$$

для реальных тел: $E=\varepsilon\cdot\sigma_0\cdot T^4$ $\quad\varepsilon=E/E_0$ – степень черноты

Закон Ламберта: $dQ_\varphi=(\varepsilon\cdot\sigma/\pi)\cdot T^4\cdot\cos\varphi\cdot d\Omega\cdot dF.$

где ф – угол между нормалью к излучающей площадке dF и направлением распространения излучения;

$d\Omega$ – элементарный угол с вершиной в центре

Конвективный + Радиационный теплообмен

Процесс переноса теплоты между потоком излучающего газа и стенкой может быть результатом совокупного действия конвективного теплообмена и теплового излучения.

Если в качестве основного воздействия принять конвекцию, то к-т теплоотдачи:

$\alpha_0 = \alpha_К + \alpha_Л$, $\alpha_к$ учитывает действие конвекции и теплопроводности, а $\alpha_л$ – действие теплового излучения.

Каждой единице поверхности этой стенки передается теплота путем соприкосновения и излучения:

$$q_К = \alpha_К \cdot (t_Ж - t_С) \qquad q_Л = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_Ж}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_С}{100}\right)^4\right] \qquad q_0 = q_К + q_Л = \alpha_К \cdot (t_Ж - t_С) + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_Ж}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_С}{100}\right)^4\right]$$

$$q_0 = \left\{\alpha_К + \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left[\frac{\left(\frac{T_Ж}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_С}{100}\right)^4}{T_Ж - T_С}\right]\right\} \cdot (t_Ж - t_С). \qquad \alpha_Л = \varepsilon \cdot c_0 \cdot 10^{-8} \cdot \left(T_Ж^{\ 4} - T_С^{\ 4}\right) / (T_Ж - T_С) = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \theta.$$

Если в качестве основного воздействия принять излучение, то:

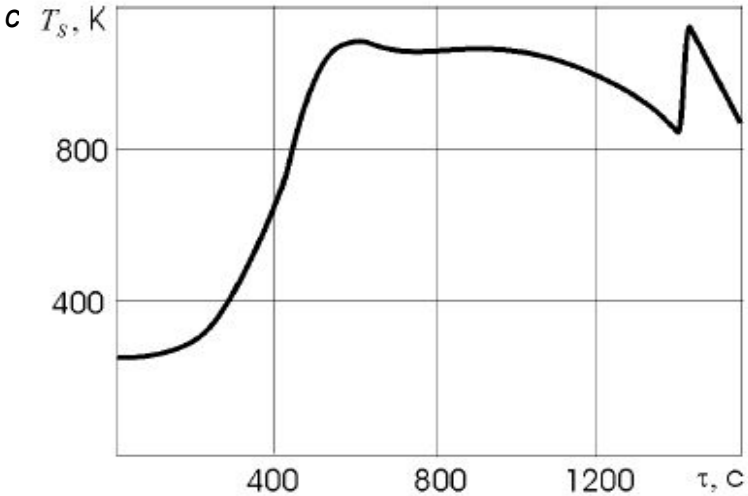
$$q_0 = (\varepsilon_К + \varepsilon) \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_Ж}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_С}{100}\right)^4\right] \qquad \varepsilon_К = \frac{\alpha_К (t_Ж - t_С)}{c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_Ж}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_С}{100}\right)^4\right]} = \frac{\alpha_К}{c_0 \cdot \theta}.$$

Теплонагруженные системы

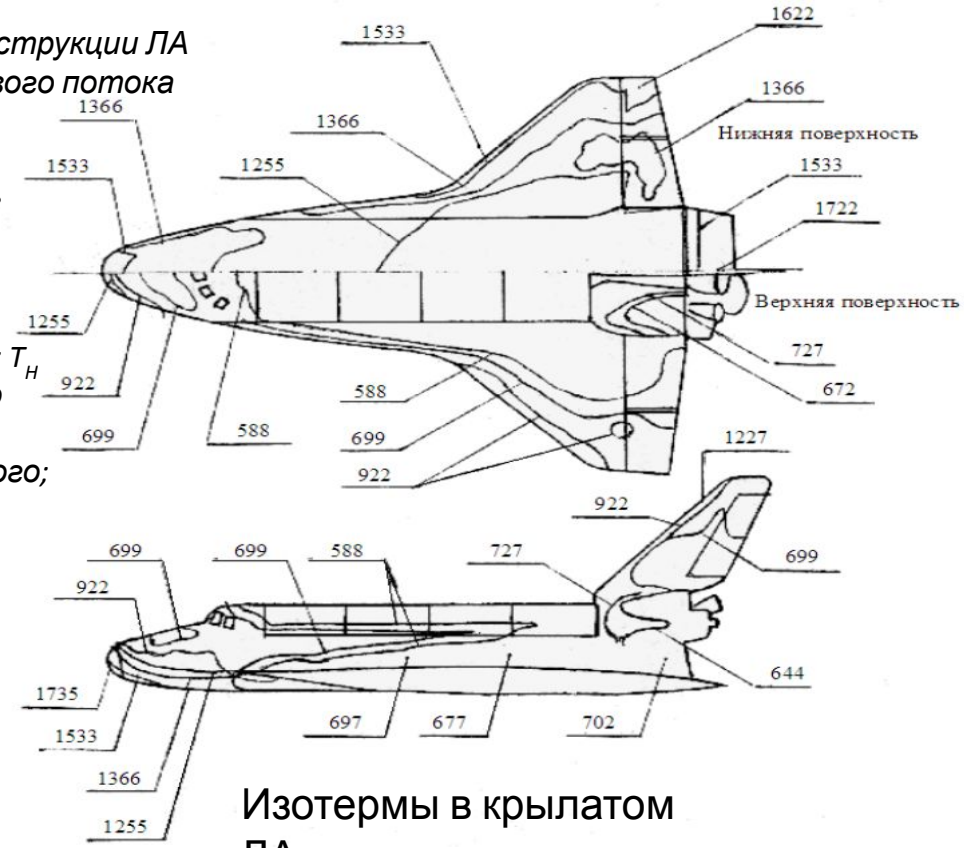
Скорость нагревания и максимальная температура конструкции ЛА определяются плотностью аккумулируемого ею теплового потока $q_{АК}$

$$q_{АК} = q_{ПГ} - q_{ЛУЧ} = \alpha \cdot (T_{AW} - T_S) - \sigma \cdot \varepsilon_S \cdot T_S^{\,4},$$

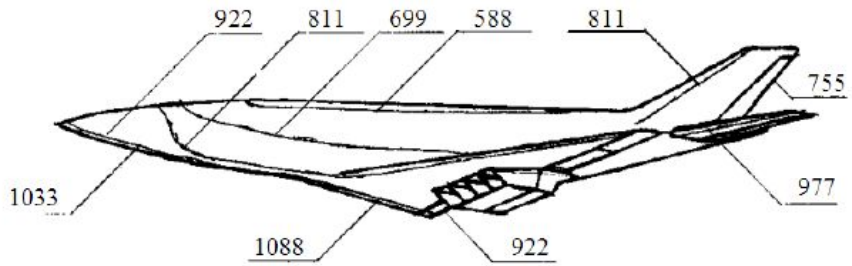
где $q_{ПГ}$ *– плотность теплового потока, поступающего в конструкцию от пограничного слоя;* $q_{ЛУЧ}$ *– плотность лучистого потока, испускаемого конструкцией в окружающую среду;*
$T_{AW}=T_H(1+r\cdot 0{,}2M^2)$ *– температура адиабатической стенки;* T_H *– температура потока у внешней границы пограничного слоя; r – коэффициент восстановления, равный 0,84 для ламинарного пограничного слоя и 0,89 – для турбулентного;*
T_S *– температура нагреваемой поверхности; α – коэффициент теплоотдачи;* $\sigma=5{,}67\cdot 10^{-11}$ *кВт/(м²·К⁴) –*
п… ная
с



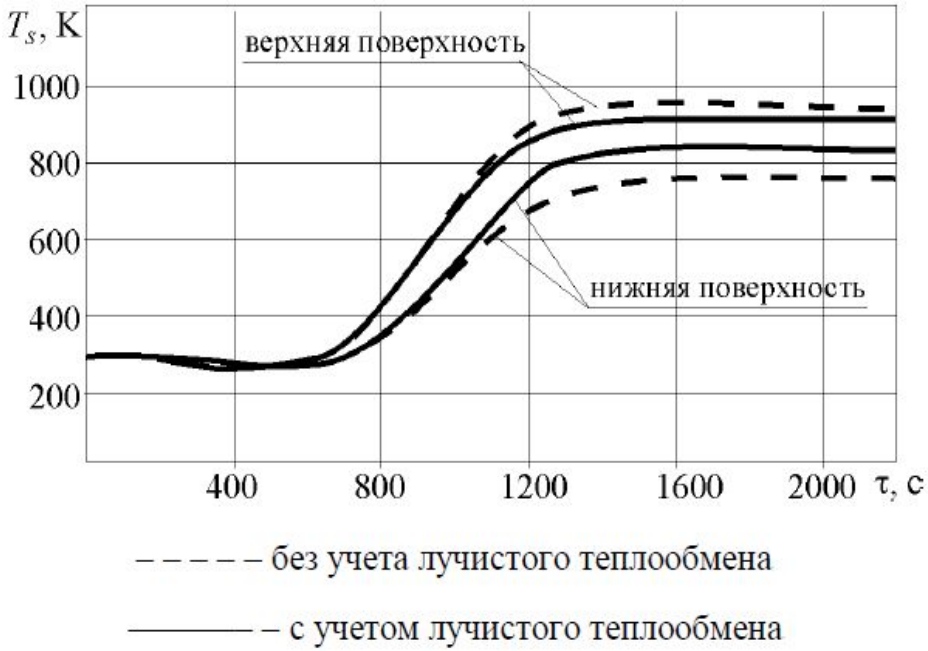
Температура нижней поверхности ВКС «Спейс-Шаттл»



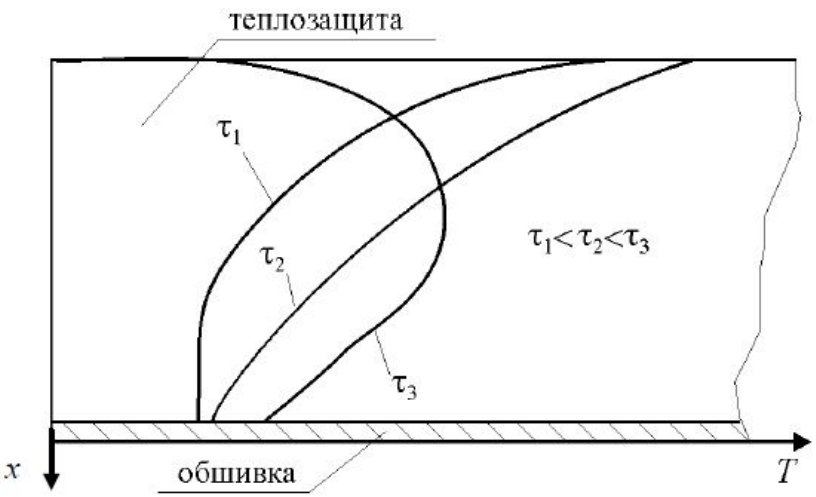
Изотермы в крылатом пл



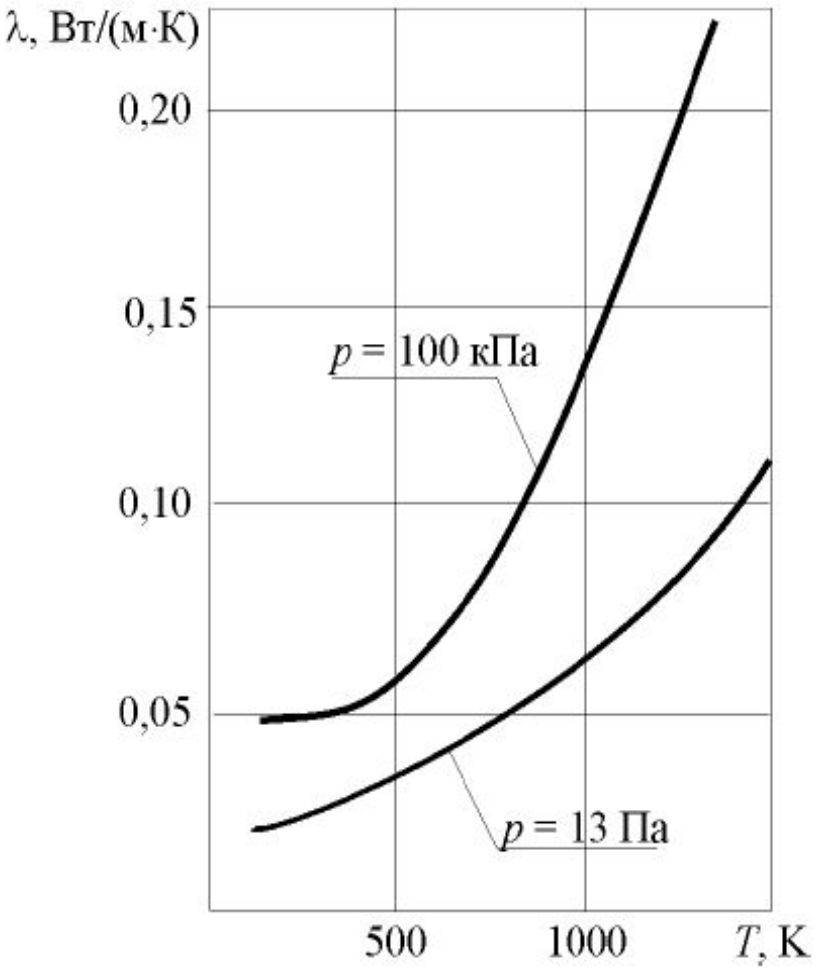
Установившаяся температура поверхности ЛА
(M=6, высота полета 30000 м)



Влияние лучистого теплообмена внутри крыла



Распределение температуры по толщине теплозащиты ВКС



Зависимость коэффициента теплопроводности материала ТЗП «Спейс Шаттла»

Влияния нагрева на НДС и несущую способность конст

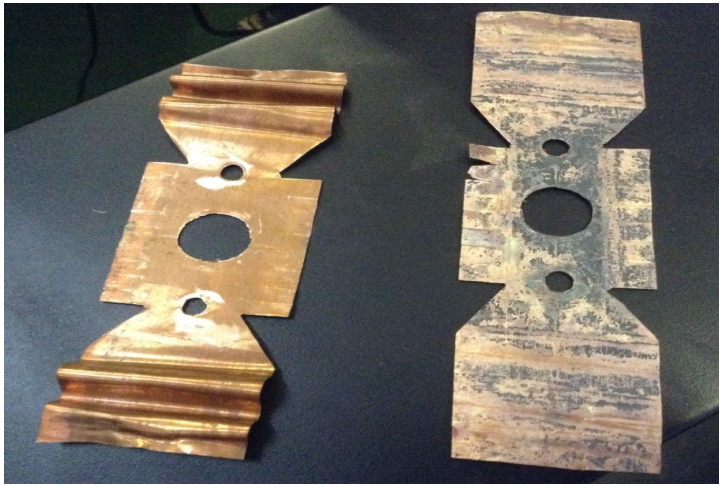
1. ***Снижение механических характеристик материалов.***

2. Ползучесть материалов.

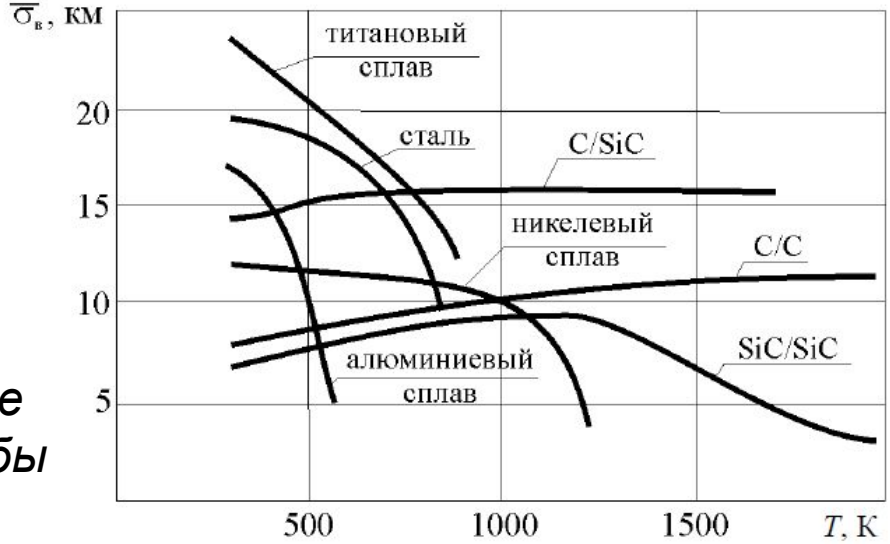
$$\varepsilon_{П} = \exp(-U_0 / RT) \cdot f(\sigma),$$

где U_0 – энергия активации (минимальное кол-во энергии, которое необходимо сообщить системе, чтобы произошла реакция); R – газовая постоянная; f(σ) – степенная функция напряжения.

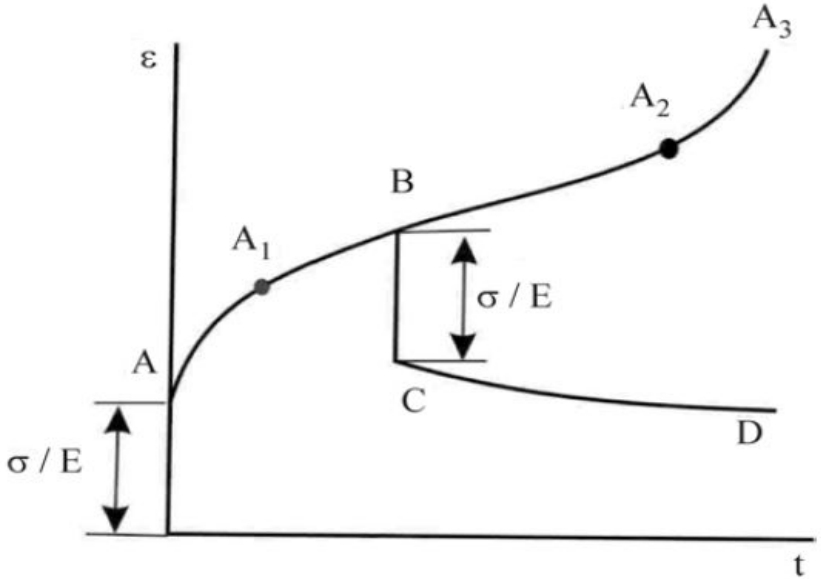
3. Окисление материалов.



4. Температурные напряжения.



Удельное сопротивление



Ползучесть при постоянном напряжении

Классификация средств нагрева

Контактный нагрев

Электрические источники

Объемный нагрев

СВЧ-нагреватели, прямое пропускание тока

Конвективный нагрев

Аэродинамические трубы, газодинамические стенды на базе твердого и жидкого топлив, электродуговые установки

Радиационный нагрев

Электрические источники с твердым телом накала и газоразрядные, лазеры, солнечные печи, солнечно-лазерные системы