

# Расчёт теплового режима

# Проверочные расчёты теплового режима

Цель. Рассчитать температуру ЭРЭ при макс температуре ОС и сравнить с допустимой ЭРЭ. Рассчитывают:

- температуру элементов с большим тепловыделением ( $T_{\text{кристалла}}$ ,  $T_{\text{корпуса}}$ )
- Среднюю температуру поверхности ячейки (тепловой зоны) и сравнивают с максимальной температурой самого нестойкого элемента (обычно это э-лит. конденсаторы, кварцы, пластиковые разъемы.)
- Если  **$T_{\text{макс эрэ раб}} < T_{\text{макс эрэ ту}}$**  ОК

# Модификация

- Цель 2. Зная макс. доп. температуру ЭРЭ рассчитать макс температуру ОС при которой будет достигнута эта температура и сравнить её максимальной температурой по ТЗ.
- Если  **$T_{OS \text{ макс раб}} \geq T_{os \text{ макс тз}}$**  ОК

# Способы передачи тепла

**Кондукция=теплопроводность** –передача тепла через непосредственное взаимодействие (соударение) атомов и молекул. Хорошо- в твёрдых телах, жидкости, плохо в газе т.к. там малая концентрация молекул.

**Излучение**- передача тепла с помощью ЭМ волн в прозрачной среде (газ, вакуум, стекло) Движущийся атом/ион/молекула может излучать или поглощать фотон энергии. Дуализм= фотон это частица(квант) и ЭМ волна. Спектр излучения- более длинноволновый чем красный видимый свет. Диапазон теплового излучения называется **инфракрасным (ИК)** или тепловым излучением, зоны ИК излучения:

ближняя:  $\lambda = 0,74—2,5$  мкм; 1,45мкм- поглощение водой. ИК светодиоды, волоконная оптика.

средняя:  $\lambda = 2,5—50$  мкм; 3-8 мкм-свечение тел 100-800 °С (головки наведения)

8-15 мм излучают тела около 0 -100°С (тепловизоры)

далёкая:  $\lambda = 50—2000$  мкм. Это уже суб мм и мм радио диапазон

**Конвекция**- передача тепла перемещением с массой нагретого вещества (газ,жидкость, гранулы, пыль, зерно..) Нет в твёрдых телах.

- ✓ Естественная конвекция-перемещение за счёт сил тяготения ( нет при невесомости)- тёплый воздух, жидкость расширяется, становится легче поднимается вверх;
- ✓ Принудительная конвекция- вентилятором, насосом.

# Принцип Электротепловой аналогии

Электричество	Тепло
Течёт ток $I$ [А]	Течёт тепловая мощность $P$ [Вт]
Потенциал $\varphi$ [В]	Температура $t$ [град]
Напряжение $U = \varphi_1 - \varphi_2$	Перегрев $\Delta t = t_1 - t_2$
Сопротивление $R$ [Ом]	Тепловое сопротивление $Rt = 1/\delta$ [град/Вт]
Проводимость $\delta = 1/R$ [сименс][1/Ом]	Тепловая проводимость $\delta = 1/Rt$ [Вт/град] $\delta = 1/Rt$ $\delta t = \lambda S/l$ $\delta k = \alpha_k * S$ $\delta i = \alpha_i * S$ $\lambda$ - удельная проводимость материала кондукцией (не зависит от $t_1$ и $t_2$ ) [Вт/м град] $\alpha_k, \alpha_i$ -удельная проводимость конвекцией и излучением [Вт/м <sup>2</sup> град] (зависит от $t_1$ и $t_2$ )
Закон Ома $I = U/R = U * \delta$ $U = I * R = I / \delta$	$P = \Delta t * \delta = (t_1 - t_2) * \delta$ $\Delta t = P / \delta$

# Принцип Электротепловой аналогии

$$I = U/R = (1/R) * U = \sigma * U = \sigma * (\phi_1 - \phi_2)$$

$$J_{\text{э}} = \sigma_{\text{э}} (\varphi_1 - \varphi_2)$$

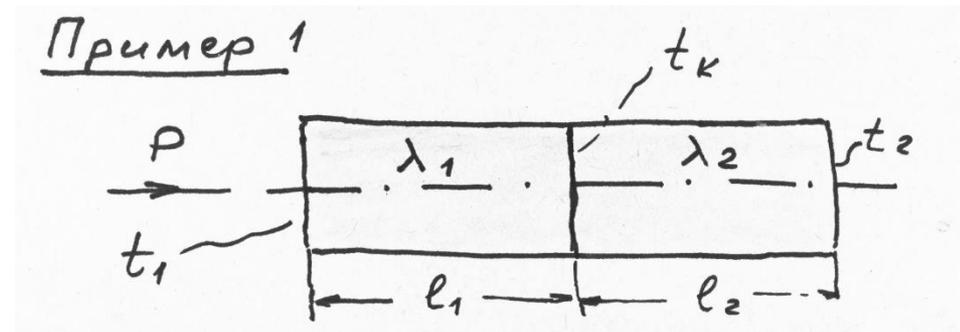
$$P_T = \alpha_T S'_{\text{ср}} (t_1 - t_2)$$

$$P_K = \alpha_K S' (t_1 - t_2)$$

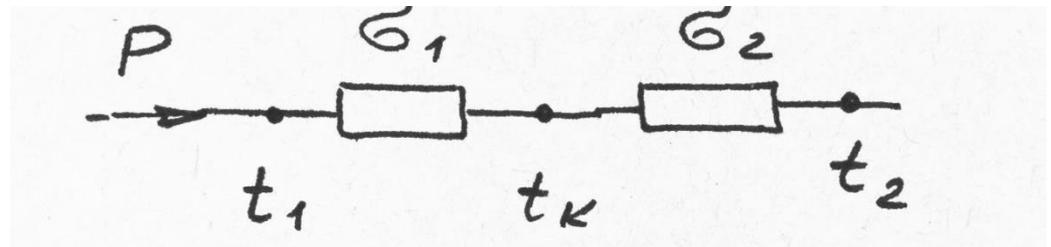
$$P_{\lambda} = \alpha_{\lambda} S' (t_1 - t_2)$$

# Пример

Последовательно  
2 цилиндра разного  
материала



Тепловая схема



Расчёт:

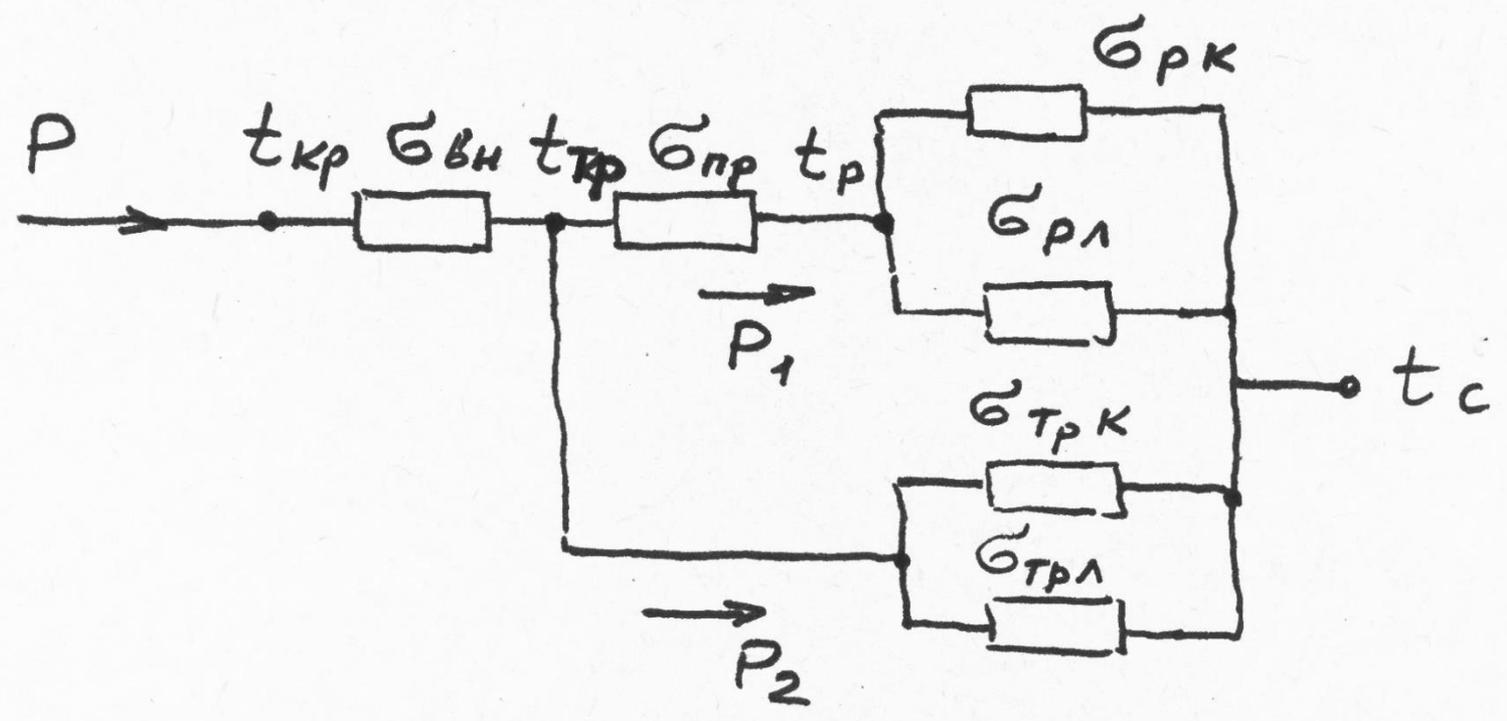
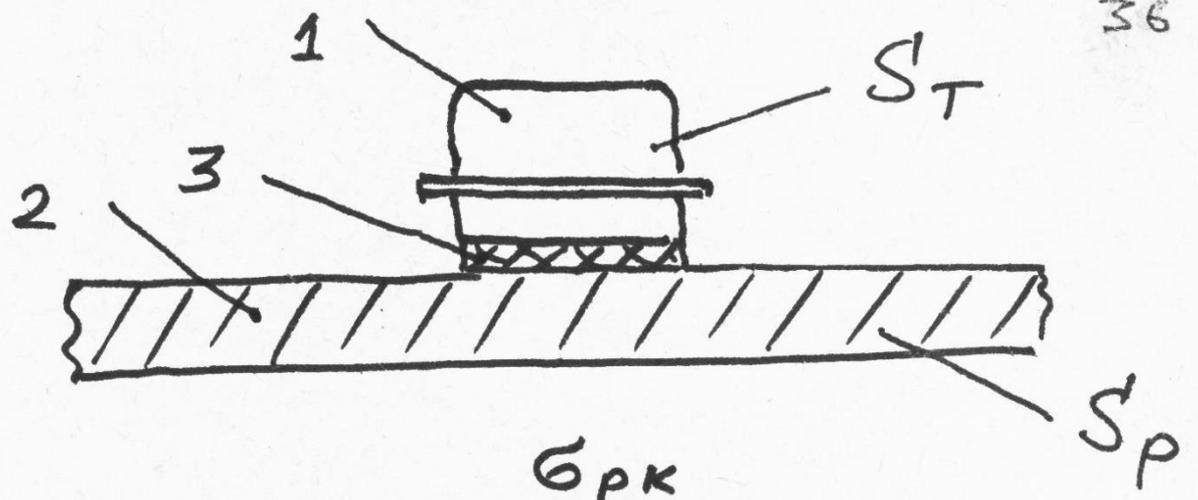
$$P = B_2 (t_k - t_2) = B_1 (t_1 - t_k)$$

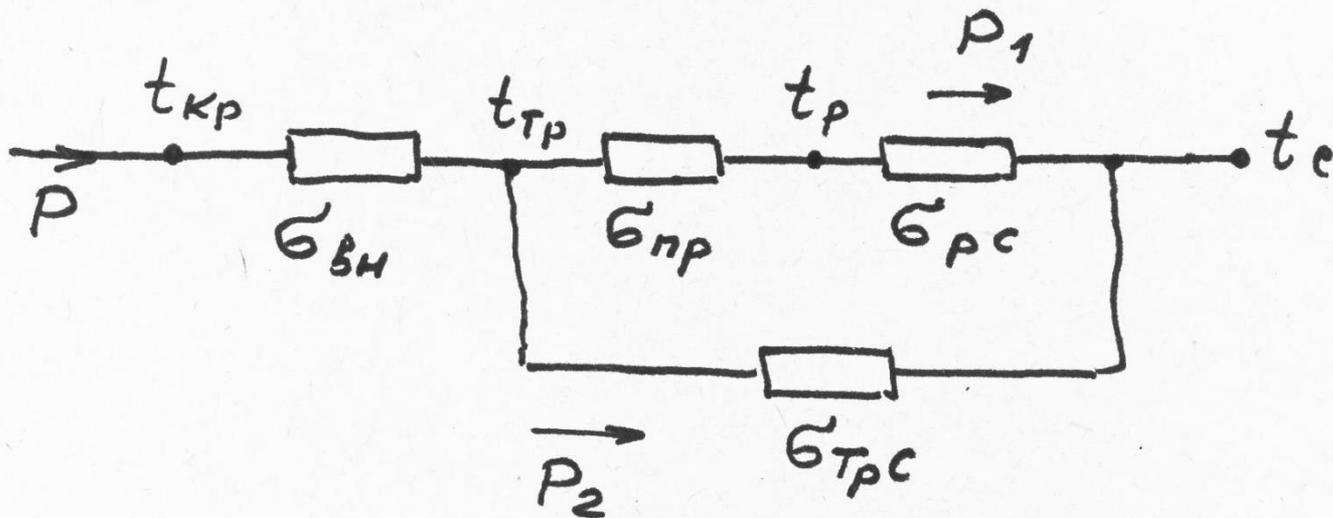
$$t_k = t_2 + P / B_2; \quad t_1 = t_k + P / B_1;$$

$$B_1 = \lambda_1 \pi d^2 / 4 l_1;$$

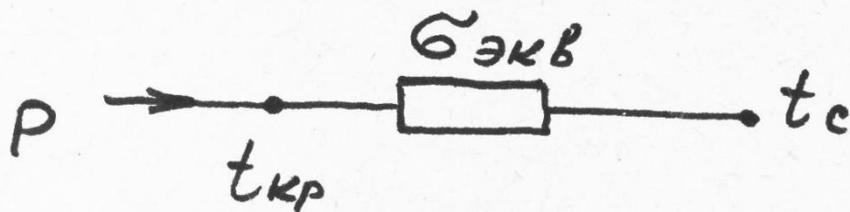
$$B_2 = \lambda_2 \pi d^2 / 4 l_2;$$

# Пример 2





$$\epsilon_{рс} = \epsilon_{рк} + \epsilon_{рл} ; \quad \epsilon_{трс} = \epsilon_{трк} + \epsilon_{трл} ;$$



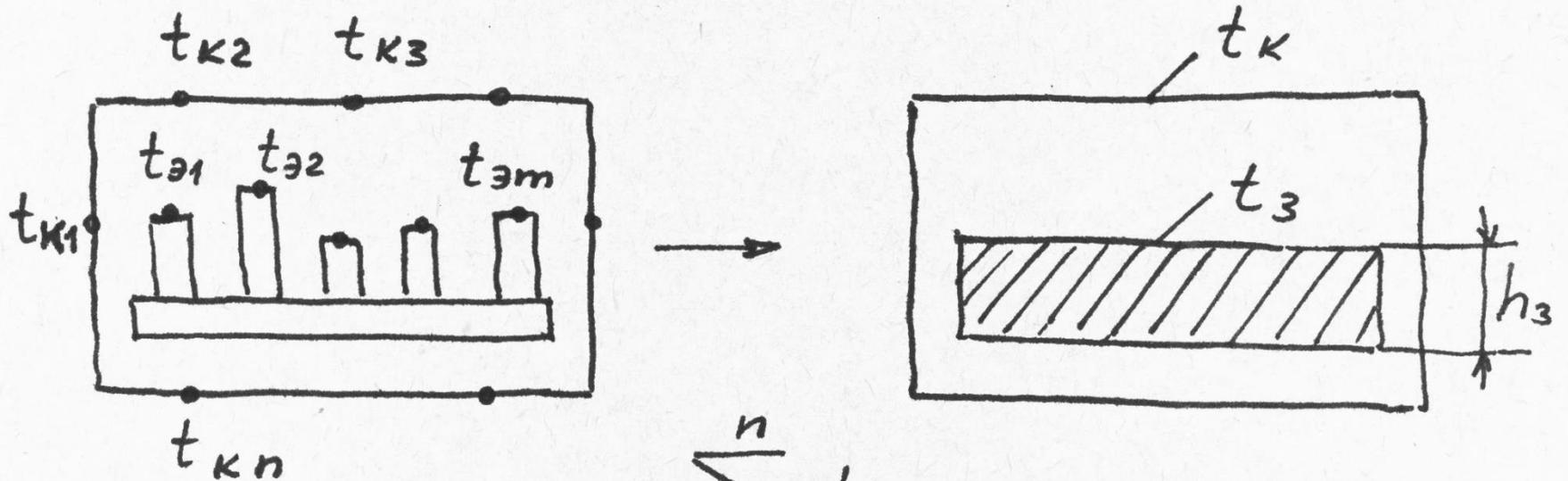
$$t_{кр} = t_c + P / \epsilon_{экв} ;$$

# Моделирование

1. Для создания тепловых схем и применения законов теплофизики, где тепло передаётся от поверхности  $S_1$  с **одинаковой**  $t_1$  к  $S_2$  с **одинаковой**  $t_2$  следует выделить в реальной конструкции **ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ** поверхности.

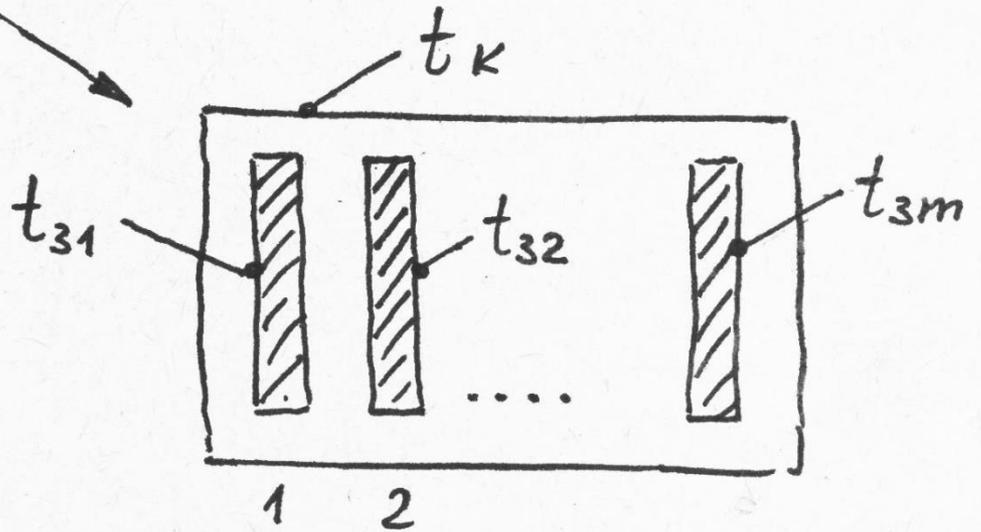
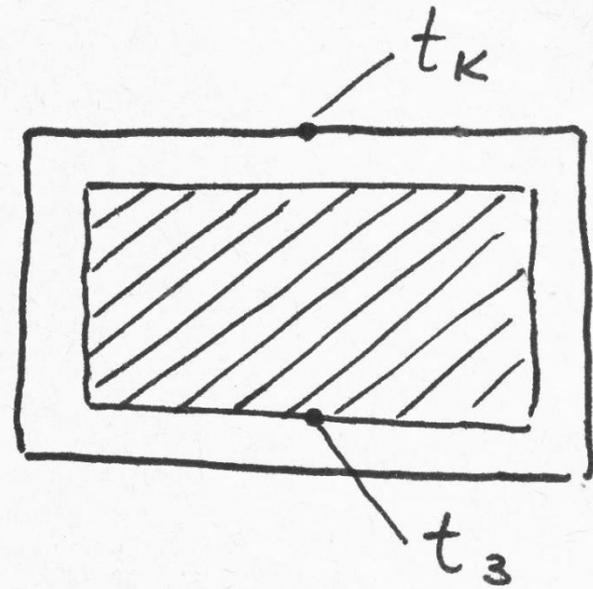
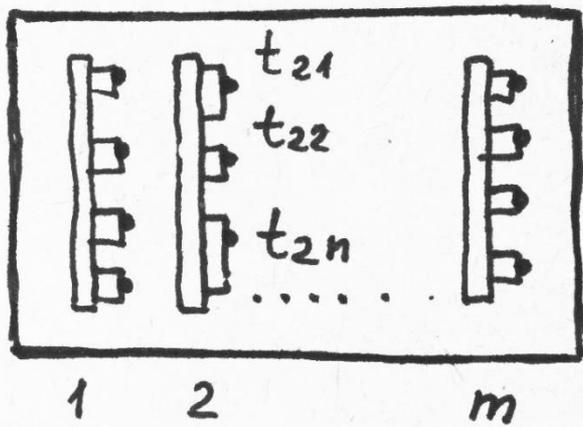
Упрощённое представление теплопередачи в РЭС как передачу тепла между изотермическими поверхностями называют **изотермическим моделированием**, а модель - **изотермической моделью РЭС**

# 1 Изотермические поверхности



$$t_{к} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{кi}}{n};$$

$$t_{э} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{эi}}{m}; \quad h_{э} = h_{пл} + \frac{\sum_{i=1}^m h_{эi}}{m};$$



## 2 Однородное анизотропное тело

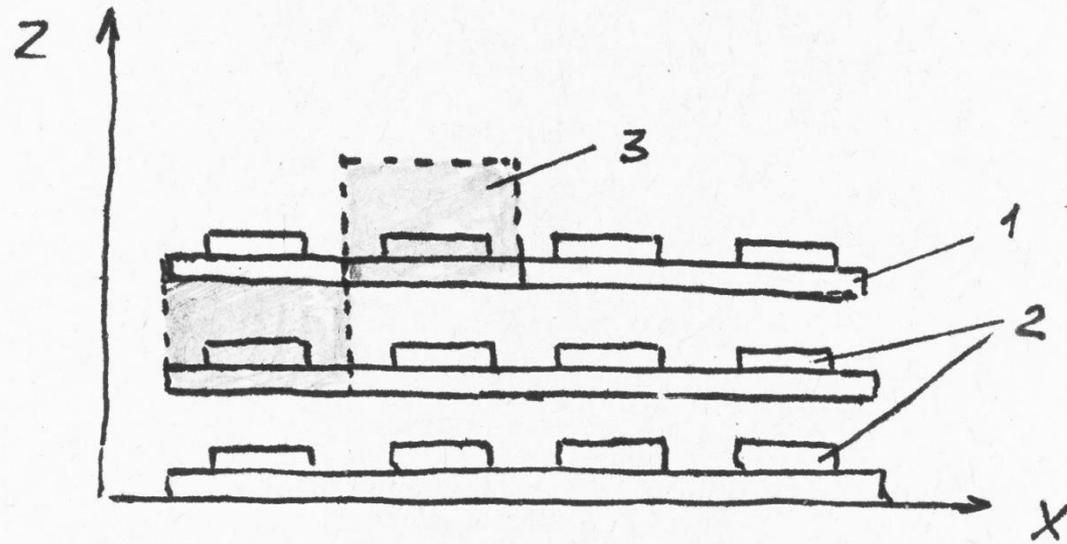
- Для моделирования передачи тепла в пакете ФЯ. Этот пакет можно представить как твёрдое **однородное анизотропное тело**, т.е. тело у которого теплопроводность в разных направлениях разные (анизотропное) и одинаковое во всех точках.

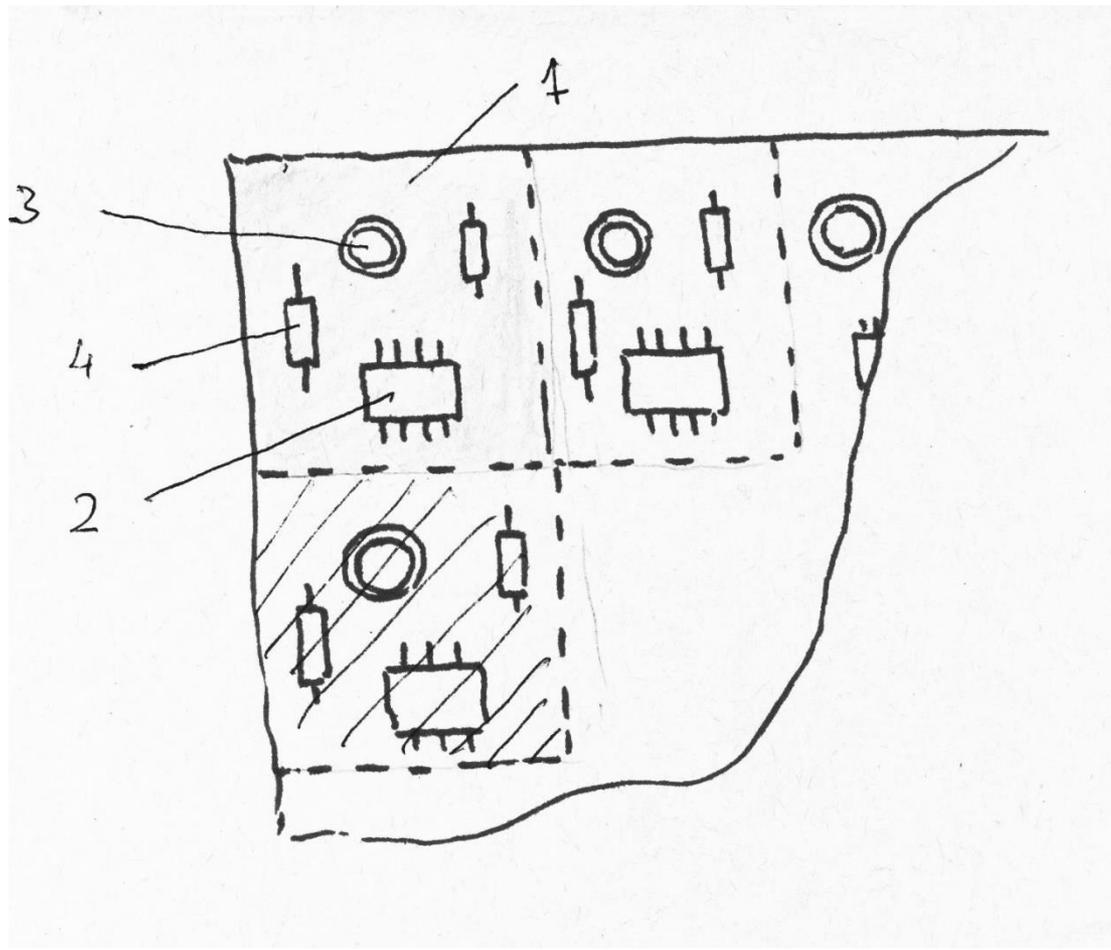
Проводимость по 3-м осям можно рассчитать, разбив такое тело на малые прямоугольники с известной проводимостью.

44

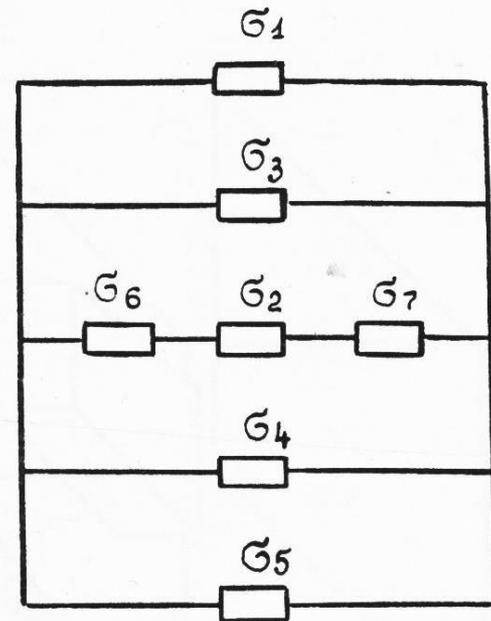
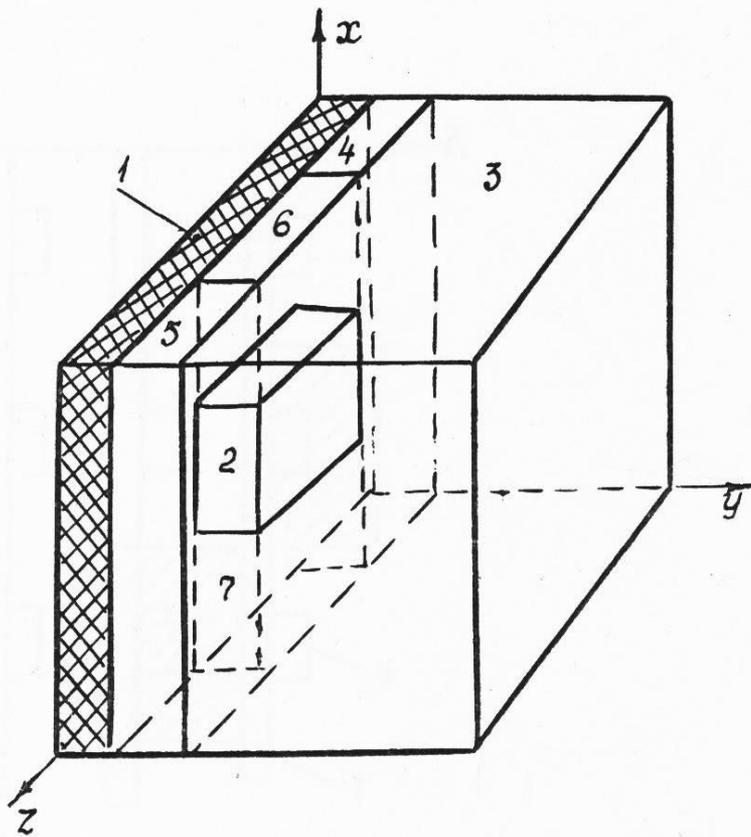
# Порядок построения тепловой модели.

1. Выбор элементарной тепловой ячейки





# По оси X



$$\lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = -P_{0v}$$

$$t \Big|_{x=0,5l_x} = t \Big|_{y=0,5l_y} = t \Big|_{z=0,5l_z} = t_{30}$$

$$R_{03} = \frac{c l_z}{4 \lambda_z l_x l_y};$$

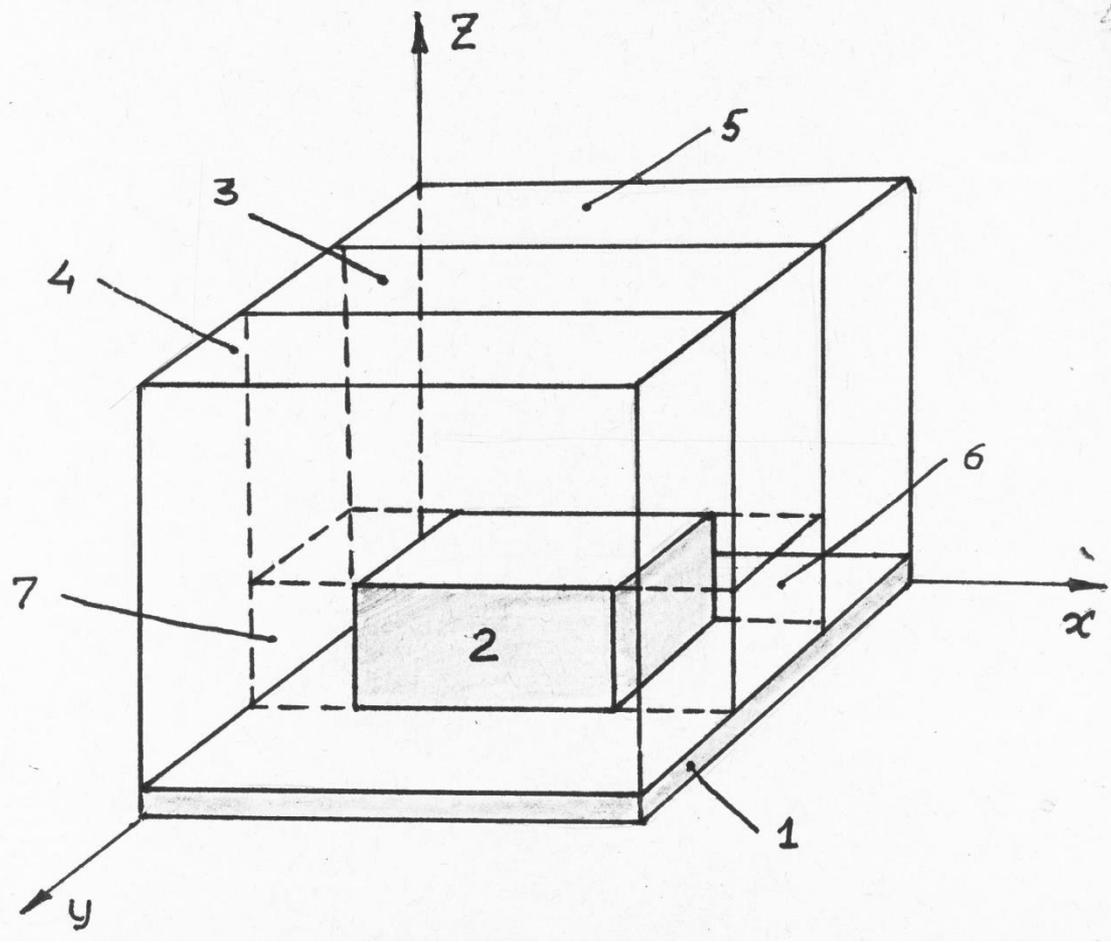
$$c = f \left( \frac{l_z}{l_x} \sqrt{\frac{\lambda_z}{\lambda_x}}; \frac{l_z}{l_y} \sqrt{\frac{\lambda_z}{\lambda_y}} \right);$$

Выбор направлений осей

$$l_z < l_x \sqrt{\frac{\lambda_z}{\lambda_x}} ; \quad l_z < l_y \sqrt{\frac{\lambda_z}{\lambda_y}}$$

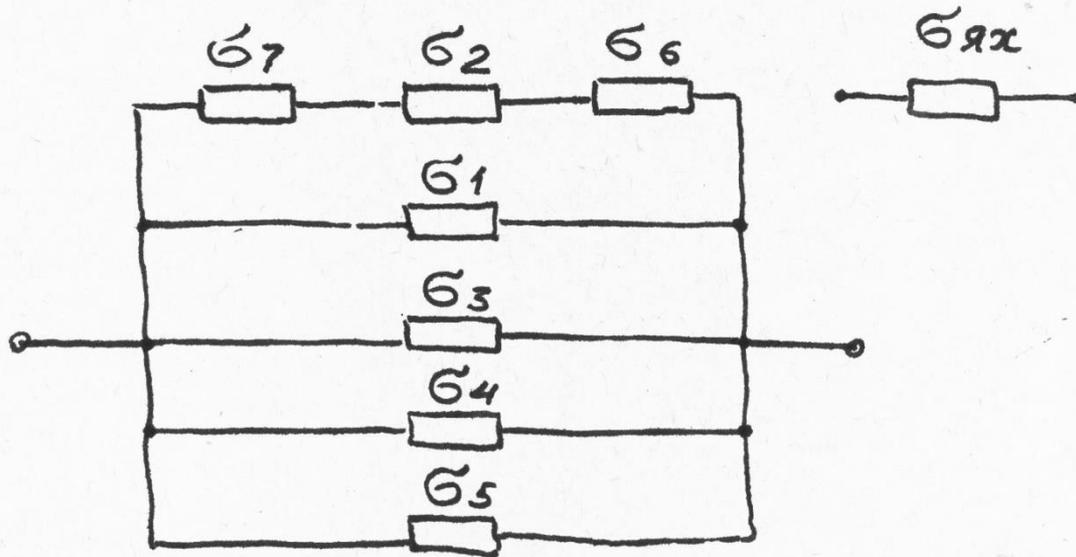
~~Для~~ Для любой точки:

$$R_{jz} = R_{0z} \left( 1 - \frac{l_j^2}{L_j^2} \right)$$



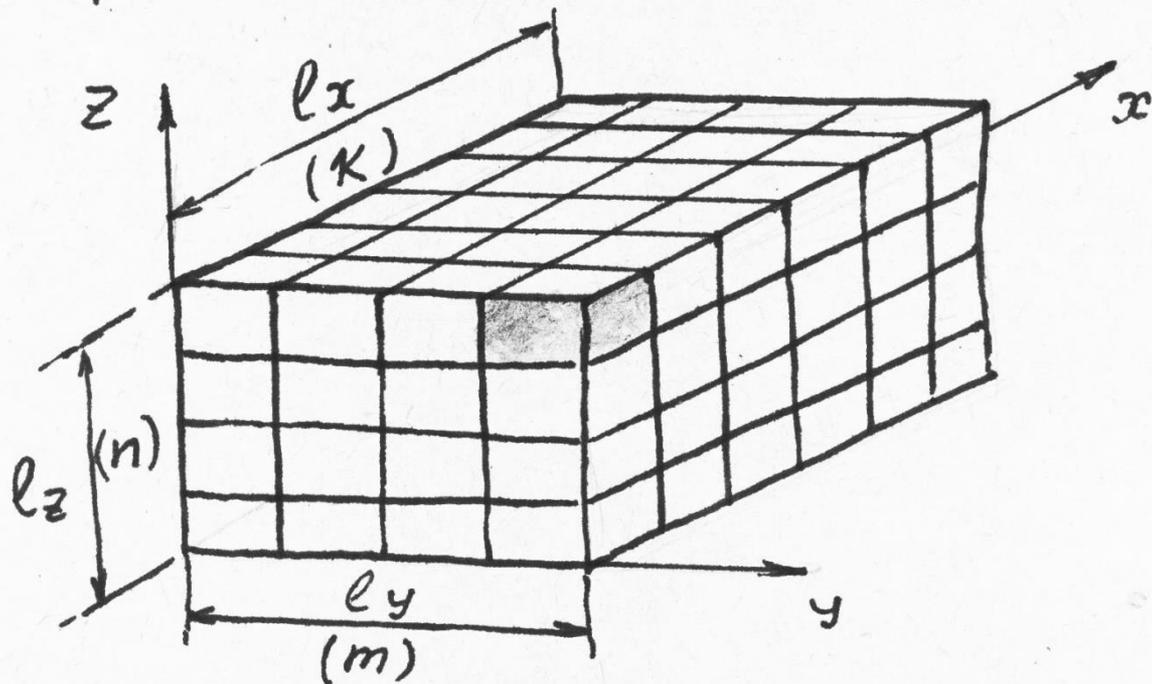
### 3. Составление тепловых схем элементарной тепловой ячейки

Ось X



$$B_{1x} = \frac{\lambda_{пл} l_{ay} \cdot \delta_{пл}}{l_{ax}} ;$$

4. Определение коэффициентов теплопроводности  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ ,  $\lambda_z$ ;



$$\sigma_x = \sigma_{ax} \frac{m \cdot n}{k};$$

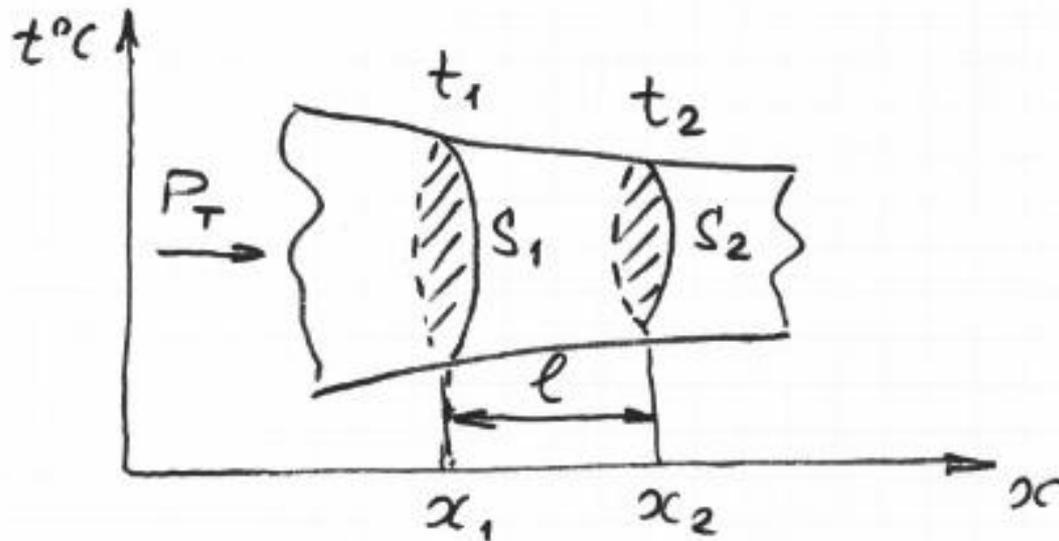
$$\sigma_x = \lambda_x \frac{l_y l_z}{l_x};$$

$$\lambda_x = \sigma_x \frac{l_x}{l_y l_z}$$

$$\sigma_y = \sigma_{ay} \frac{k \cdot n}{m}; \quad \lambda_y = \sigma_y \frac{l_y}{l_x l_z};$$

$$\sigma_z = \sigma_{az} \frac{k \cdot m}{n}; \quad \lambda_z = \sigma_z \frac{l_z}{l_x l_y};$$

# Кондукция= теплопроводность

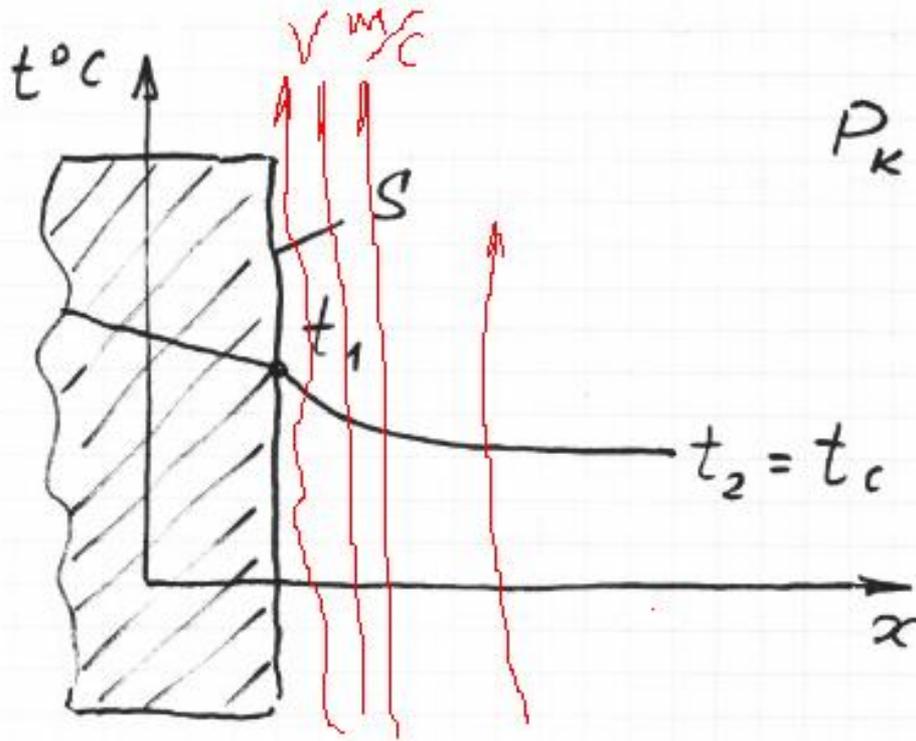


$$P_T = d_T S_{cp} (t_1 - t_2)$$

$$d_T = \frac{\lambda}{x_2 - x_1} = \frac{\lambda}{l}$$

$$S_{cp} = 0,5 (S_1 + S_2)$$

# Конвекция



$$P_k = \alpha_k S (t_1 - t_2)$$

$$\alpha_k = \alpha_k(t_1, t_2, \beta, \lambda, c_p, \nu, a, g, \rho)$$

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$$

$$\beta, \frac{1}{^{\circ}\text{C}}; \quad \lambda, \frac{\text{BT}}{\text{M}^{\circ}\text{C}};$$

$$C_p = \frac{\partial X}{\text{K}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}; \quad \nu, \frac{\text{M}^2}{\text{C}}$$

$$g, \frac{\text{M}}{\text{C}^2}; \quad a, \frac{\text{M}^2}{\text{C}};$$

$$\rho, - \frac{\text{K}^2}{\text{M}^3};$$

$$\beta = \beta(t_1, t_2); \quad \lambda = \lambda(t_1, t_2)$$

$$C_p = C_p(t_1, t_2); \quad \nu = \nu(t_1, t_2)$$

$$a = a(t_1, t_2).$$

## Критерии подобия

а) Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha_k L}{\lambda}$$

б) Грасгофа

$$Gr = \beta g \frac{L^3}{\nu^2} (t_1 - t_2)$$

в) Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{a};$$

г) Рейнольдса

$$Re = \frac{vL}{\nu};$$

# Определение $\alpha_k$

$$1. \quad Nu = C (Gr Pr)^n$$

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / L$$

$$L = \sqrt{\frac{S}{6}}$$

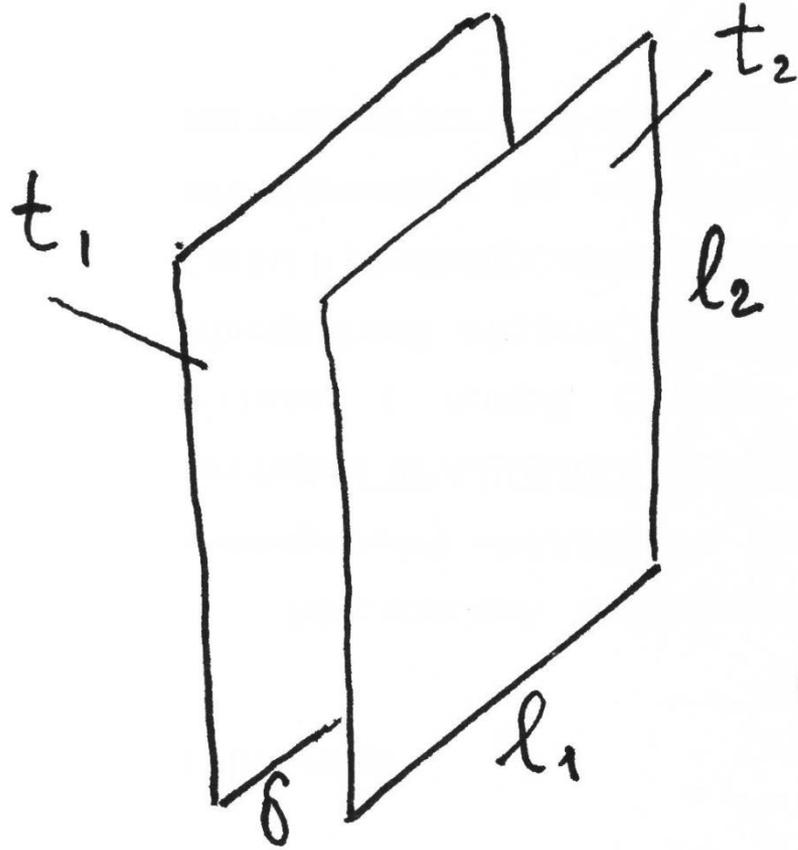
$$2. \quad \alpha_{кт} = \lambda_{экв} / \ell_{ср}$$

$$\lambda_{экв} = K \lambda$$

$$K = 1 \quad \text{при} \quad \ell_{ср} / L < 0,1,$$

$$Gr Pr < 10^3$$

$G_2 P_2$	$C$	$n$
$< 10^{-3}$	0,5	0
$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	$\frac{1}{8}$
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	$\frac{1}{4}$
$2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$	0,135	$\frac{1}{3}$



$$t_1 > t_2$$

Прямоугольные пласт.

$$\alpha_{KT} = \frac{\kappa \lambda}{\delta}$$

Цилиндрические поверхн.

$$\alpha_{KT} = \frac{2\kappa \lambda}{\delta \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

Сферические поверхн.

$$\alpha_{KT} = \frac{2\kappa \lambda d_2}{\delta d_1}$$

$$K = 0,18 (G_2 P_2)^{0,25},$$

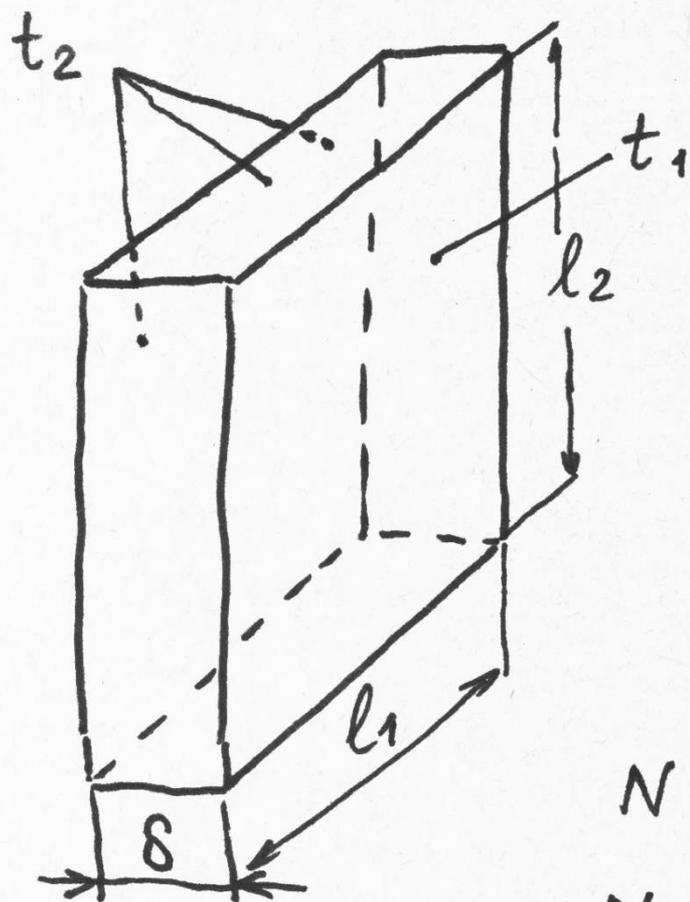
если  $G_2 P_2 > 10^3$

3

$$Nu = 0,8 \sqrt{Re}$$

$$\alpha_k = Nu \lambda / L$$

$$t_{cp} = 0,5 (t_1 + t_2)$$



$$t_1 > t_2$$

$$\alpha_k = N \left[ 6,25 - 5,25 \left( 1 + \delta / \sqrt{l_1 l_2} \right)^{-5/3} \right] \times$$

$$\times B \sqrt[4]{\Delta t / \delta},$$

$N = 1$  — вертикальный

$N = 1,3$  — горизонтальный

$$t_{cp} = 0,5 (t_1 + t_2)$$

$t_{cp}, ^\circ C$	0	50	100	200
B	0,63	0,58	0,56	0,44

≡

$$\alpha_{KH} = \alpha_{K_0} \left( \frac{H}{H_0} \right)^{2H}$$

Для воздуха

14

$$(t - t_c) < [840 / (L \cdot 10^{-3})]^3$$

$$\alpha_k = (1,42 + 1,4 \cdot 10^{-3} t_{cp}) N [(t - t_c) / L]^{1/4}$$

$$\alpha_k = (1,67 + 3,6 \cdot 10^{-3} t_{cp}) N (t - t_c)^{1/3}$$

Вид поверхности	L	N	
Шар, гориз. цилиндр	d	1,0	
Вертик. пласт. и цилиндр	h	1,0	
Горизонт. пластины	l <sub>max</sub>		
вверх			1,3
вниз			0,7

Вертик. пластины

и цилиндры

$$L = H,$$

$$N = 1;$$

Горизонт. пластины

поток Вверх

$$L_{\max}$$

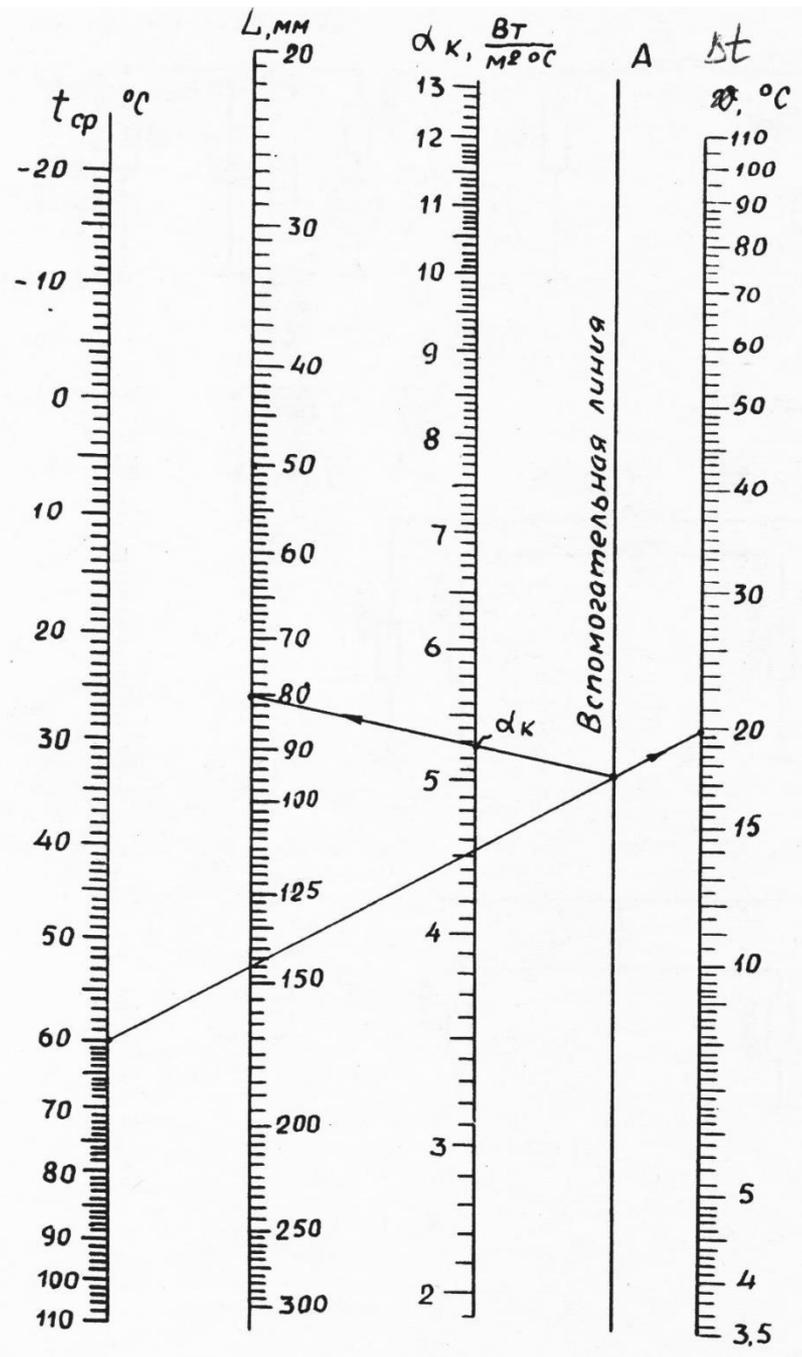
$$N = 1.3$$

поток Вниз

$$N = 0.7$$

При давлении, зависящем от температуры

$$\alpha_{kr} = \alpha_k \left( P / P_0 \right)^{2n}$$



# Принудительная конвекция

$$Re = \frac{v L}{\nu} ;$$

$Re < 2200$  - ламинарный поток

$2200 \leq Re \leq 10^4$  - переходный

$Re > 10^4$  - вихревой

$$Re_{кр} = 5 \cdot 10^5 ;$$

$$Re = \frac{vL}{\nu_f}; \quad Nu = \alpha_k L / \lambda_f;$$

Для замкнутого пространства

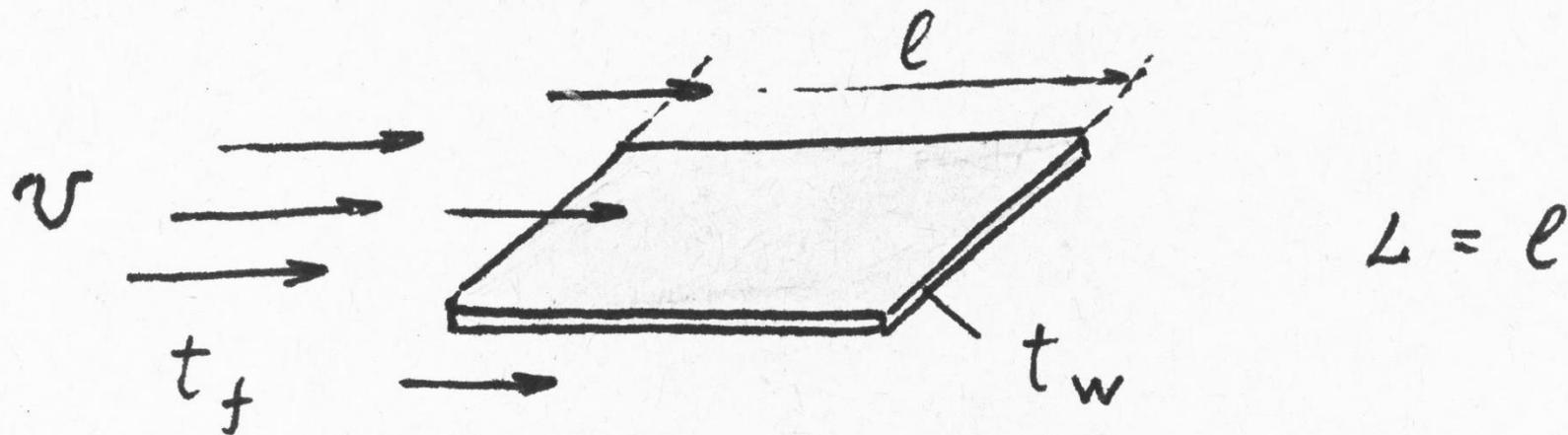
$$Nu = 0.8 \sqrt{Re}$$

$$v = G_v / A_{cp}$$

Для РЭА

$$A_{cp} = A_{корп} (1 - V_{эл} / V_k);$$

# Внешнее обтекание тел продольным потоком



Для жидкости  $Re < 5 \cdot 10^5$

$$Nu_f = 0,66 Re_f^{0,5} Pr_f^{0,43} (Pr_f Pr_w)^{0,25}$$

$$Re \geq 5 \cdot 10^5$$

$$Nu_f = 0,037 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} (Pr_f / Pr_w)^{0,25}$$

Для воздуха

$$Pr_f = Pr_w = 0,7$$

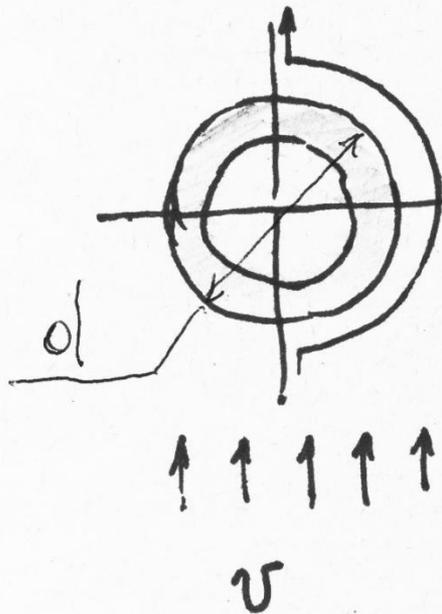
$$Re < 5 \cdot 10^5$$

$$Nu_f = 0,57 \sqrt{Re_f}$$

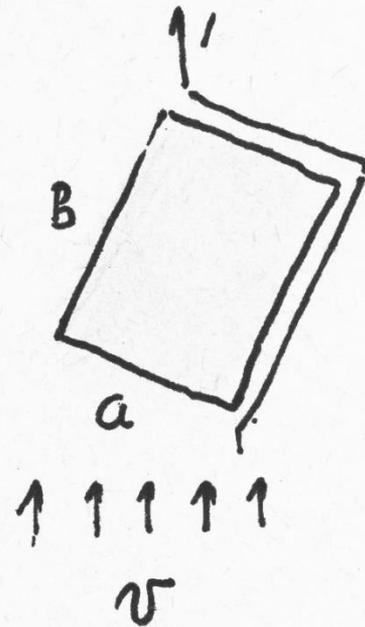
$$Re \geq 5 \cdot 10^5$$

$$Nu_f = 0,032 Re_f^{0,8}$$

# Поперечный поток воздуха



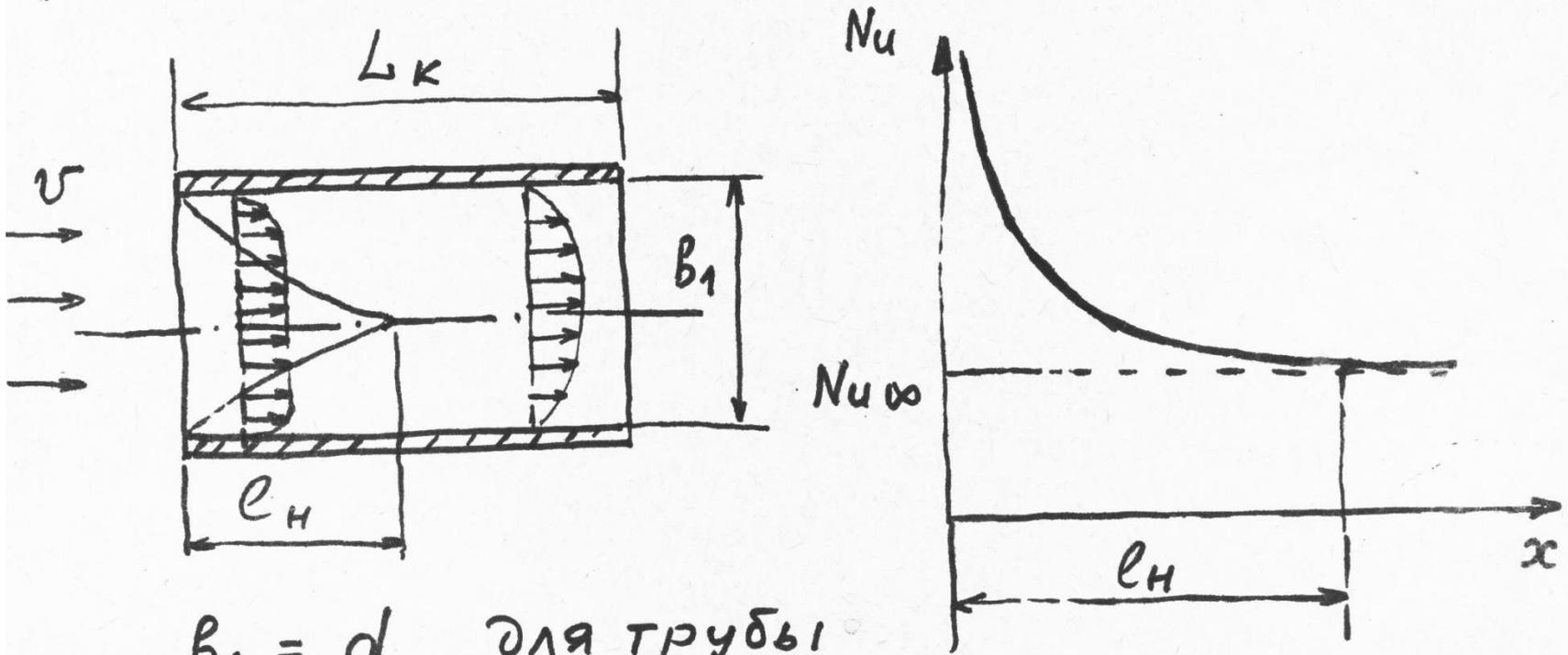
$$L = 0,5 \pi d$$



$$L = a + b$$

$$Nu = 0,8 \sqrt{Re}$$

# Вынужденная конвекция в трубах и каналах



$$B_1 = d \quad \text{для трубы}$$

$$B_1 = 4A / \Pi$$

Ламинарное течения Воздуха

$$Pr_2 = 0,7 ; \quad \nu_n = 0,01 \text{ В, Ре ;}$$

При  $L_k \leq \nu_n$

$$\bar{Nu} = 1,5 Nu_{\infty} \sqrt{\nu_n / L_k} ;$$

$$Nu_{\infty} = 4,12 ;$$

При  $L_k > \nu_n$

$$\bar{Nu} = Nu_{\infty} (1 + 0,5 \nu_n / L_k) ;$$

2  
При вихревом потоке воздуха

$$l_n = 40 B_1$$

При  $L_k \leq l_n$

$$\bar{N}_u = ~~1,165~~ 1,165 Nu_\infty (l_n / L_k)^{0,167}$$

$$Nu_\infty = 0,019 Re^{0,8};$$

При  $L_k > l_n$

$$\bar{N}_u = Nu_\infty \left( 1 + 0,165 \frac{l_n}{L_k} \right)$$

С учетом свободной конвекции 25  
Воздуха в трубе (ламинарный поток)

$$(\overline{Nu})_T = 0,13 \sqrt[3]{Re} Gr^{0,1} \cdot \epsilon'_L ;$$

$$Gr = \beta g \frac{L^3}{\nu^2} (t_w - t_f) ;$$

$$L = d ; \quad t_f = 0,5 (t'_f + t''_f) ;$$

$l_T/d$	1	2	5	10	15	20	30	50
$\epsilon'_L$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,17	1,18	1,05	1,0

Вихревой режим

$$Re \approx 20 d$$

$$(\overline{Nu})_T = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr_f / Pr_w)^{0,25};$$

$$Re = \nu d / \nu;$$

Если труба изогнута и ограничена,  
то для воды и воздуха

$$\overline{\alpha}_k = Z \nu^{0,8} \epsilon_L (1 + 1,18 d / R) / d^{0,2}$$

$t_f, ^\circ\text{C}$	-50	-20	0	20	50	100
Z (Возд)	4,3	3,92	3,74	3,56	3,40	3,10
Z (Вода)	—	—	1430	1880	2500	3190

На участке нестabilизированного  
 движения  $l_T \leq l_H = 20 d$

$$Nu = (l_H / l_T)^{1/6} (\bar{Nu})_T ;$$

$$\bar{Nu} = 1,2 (l_H / l_T)^{1/6} (\bar{Nu})_T$$

Re	$\varepsilon_L$ при $\rho_T/d$						
	1	2	5	10	15	30	50
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,5	1,34	1,23	1,17	1,07	1,0
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,05	1,0
$6 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,1	1,04	1,0
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,1	1,08	1,03	1,0
$1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,0

# ИЗЛУЧЕНИЕ

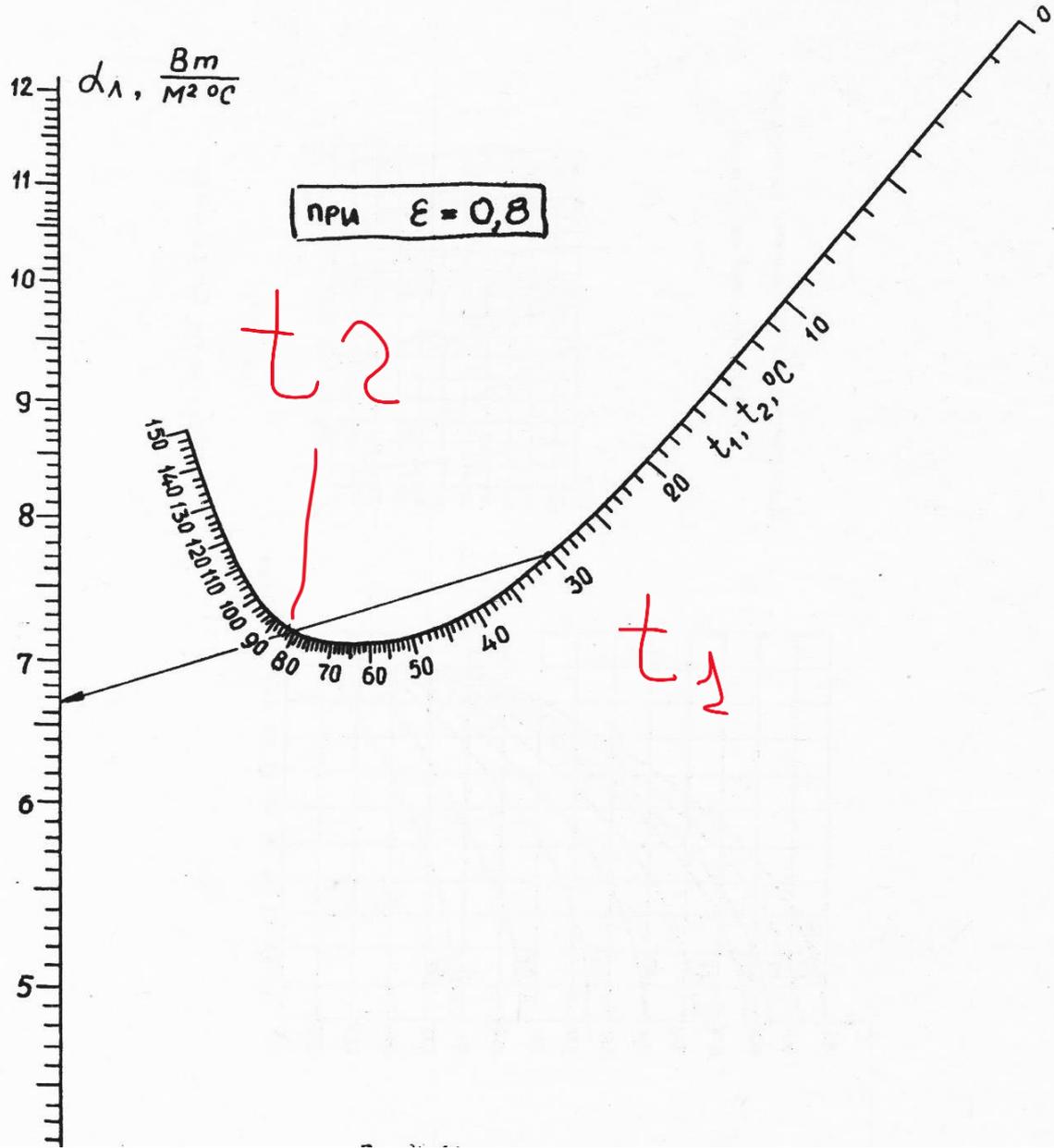
$$P_1 = \alpha_1 S (t_1 - t_2)$$

$$\alpha_1 = \varepsilon_{\text{пр}} \psi_{12} f(t_1, t_2)$$

$$f(t_1, t_2) = 5,673 \frac{\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100}\right)^4}{t_1 - t_2}$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \frac{S_1}{S_2}}$$





# Проблема при расчёте

- Так как  $\alpha_k, \alpha_{и}$  - удельная проводимость конвекцией и излучением [Вт/м<sup>2</sup> град] зависит от  $t_1$  и  $t_2$  можно зная  $t_1$  и  $t_2$  найти  $b_k = \alpha_k * S$        $b_{и} = \alpha_{и} * S$  и далее
- ✓  $P = \Delta t * b = (t_1 - t_2) * b$  - можно считать
- $\Delta t = P / b$  ;  $t_1 = t_2 + P / b$  – нельзя, т.к не зная 2-х температур нельзя найти  $b_k = \alpha_k * S$  ;  $b_{и} = \alpha_{и} * S$
- Если только кондукция, то  $t_1 = t_2 + P / b$ - можно т.к  $b = \lambda S / l$  , точнее  $\lambda$  не зависит от температур

# Методы расчёта

Для решения проблем расчёта применяются следующие методы :

- Метод тепловой характеристики
- Метод последовательных приближений
- Коэффициентный метод
- Экспериментальный метод, создание теплового макета.

Цель расчета: определение  $t_j$  или  
тепловой характеристики:

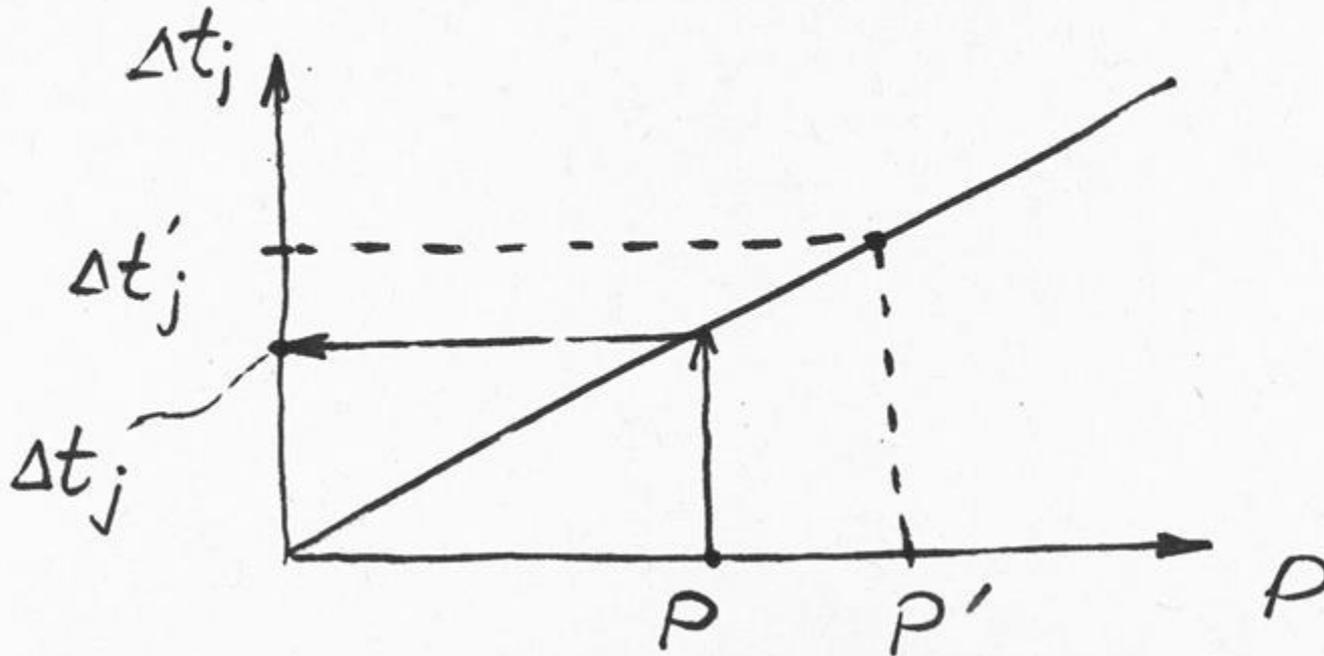
$$t_j = t_c + \varphi_1(P);$$

$$\Delta t_j = t_j - t_c = \varphi(P)$$

$$\varphi(P) = P / \sigma_\Sigma ,$$

# Метод тепловой характеристики

$$P' = \sigma'_{\Sigma} \Delta t'_j ;$$



# Метод последовательных приближений

1.  $\Delta t'_j = (10 \dots 15) \text{ } ^\circ\text{C}$

2.  $t'_j = t_c + \Delta t'_j$ ;  $t'_{cp} = 0,5(t'_j + t_c) =$   
 $= 0,5(2t_c + \Delta t'_j)$ ;

3. Для  $t'_{cp}$  находят  $\alpha'_k$ ,

для  $t'_j$  определяют  $\alpha'_\lambda$  ;

$$4. \quad \sigma'_\Sigma = \sigma_T + \sigma'_K + \sigma'_\lambda ,$$

$$\sigma_T = \lambda S_{cp} / l ; \quad \sigma'_K = \alpha'_K S_K ;$$

$$\sigma'_\lambda = \alpha'_\lambda S_\lambda ;$$

$$5. \quad \Delta t'_{j \text{ расч}} = P / \sigma'_\Sigma ;$$

$$6. \quad | \Delta t'_j - \Delta t'_{j \text{ расч}} | \leq \delta ;$$

$$\delta = (1 \dots 2)^\circ \text{C}$$

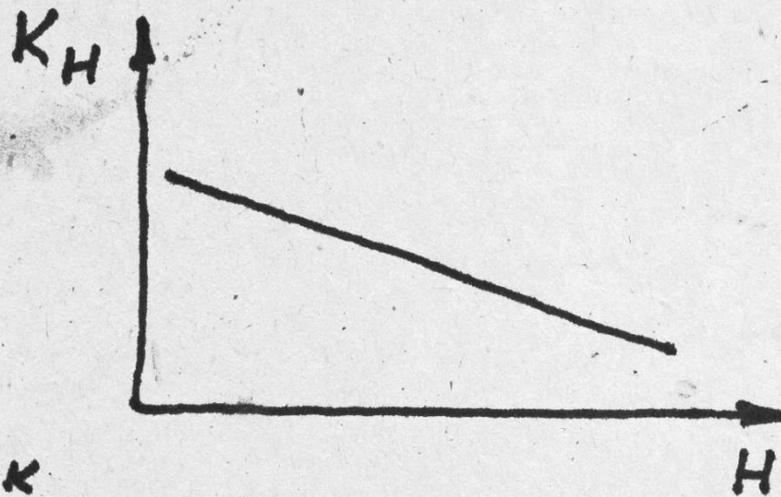
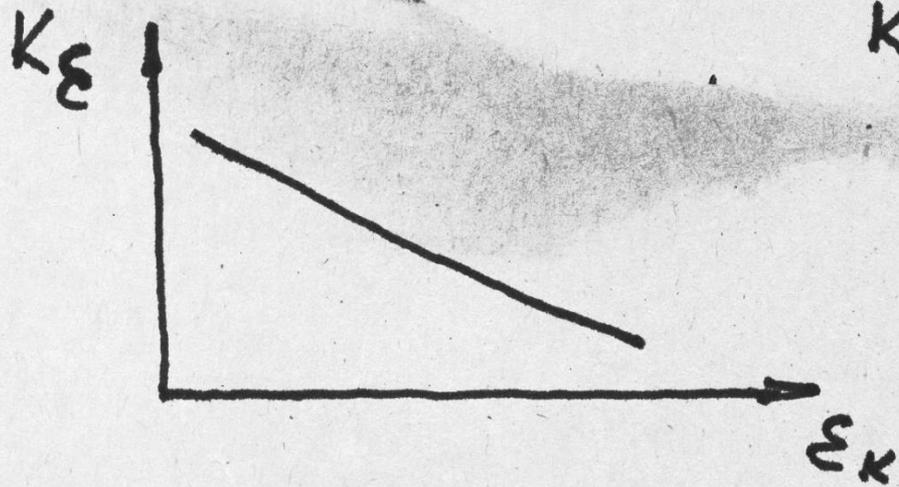
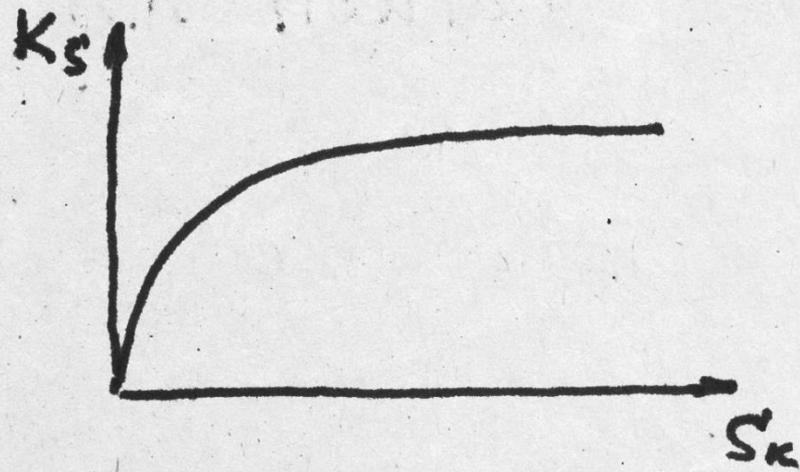
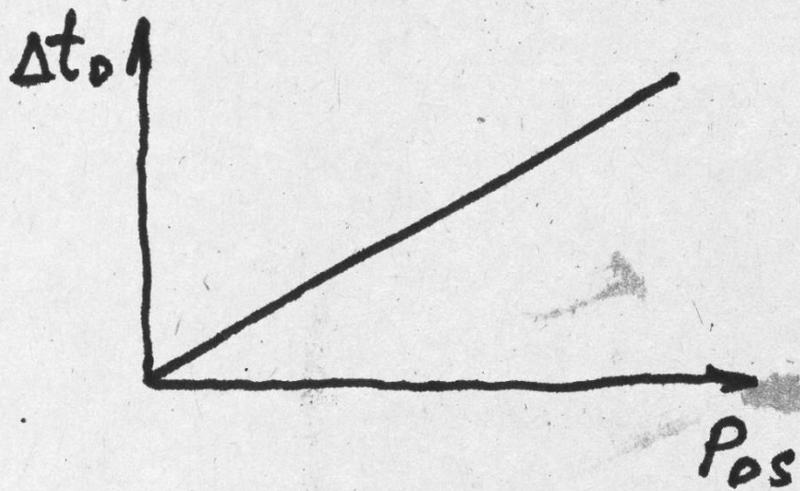
7. Если неравенство не выполняется,

то  $\Delta t''_j = \Delta t'_{j \text{ расч}} ;$

# Коэффициентный метод

$$t = t_0 \prod_{i=1}^n K_i$$

$$\Delta t = \Delta t_0 \prod_{i=1}^n K_i$$



Пример. Определить  $t_k$  корпуса блока

$$L_x \cdot L_y \cdot L_z = 0,176 \cdot 0,095 \cdot 0,072 \text{ м при } \bar{v}$$

$P = 16 \text{ Вт}$ , давлению окр. среды  $M = 760 \text{ мм рт. ст.}$  и  $t_c = 20^\circ\text{C}$ . Корпус окрашен

эмалевой краской  $\varepsilon_k = 0,92$

$$S_k = 2(0,176 \cdot 0,095 + 0,176 \cdot 0,072 + 0,095 \cdot 0,072) = \\ = 0,0724 \text{ м}^2$$

$$P_s = P/S_k = 16/0,0724 = 221 \text{ Вт/м}^2$$

$$\Delta t_0 = 21,9^\circ\text{C}; \quad K_s = 0,93; \quad K_\varepsilon = 1,0;$$

$$K_h = 1,0.$$

$$\Delta t_k = \Delta t_0 \cdot K_s \cdot K_\varepsilon \cdot K_h = 21,9 \cdot 0,93 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = \\ = 20,4^\circ\text{C}; \quad t_k = t_c + \Delta t_k = 21,9 + 20,4 = 40,4^\circ\text{C}$$

Расчёт теплового режима  
конструкций с естественной вентиля-  
цией

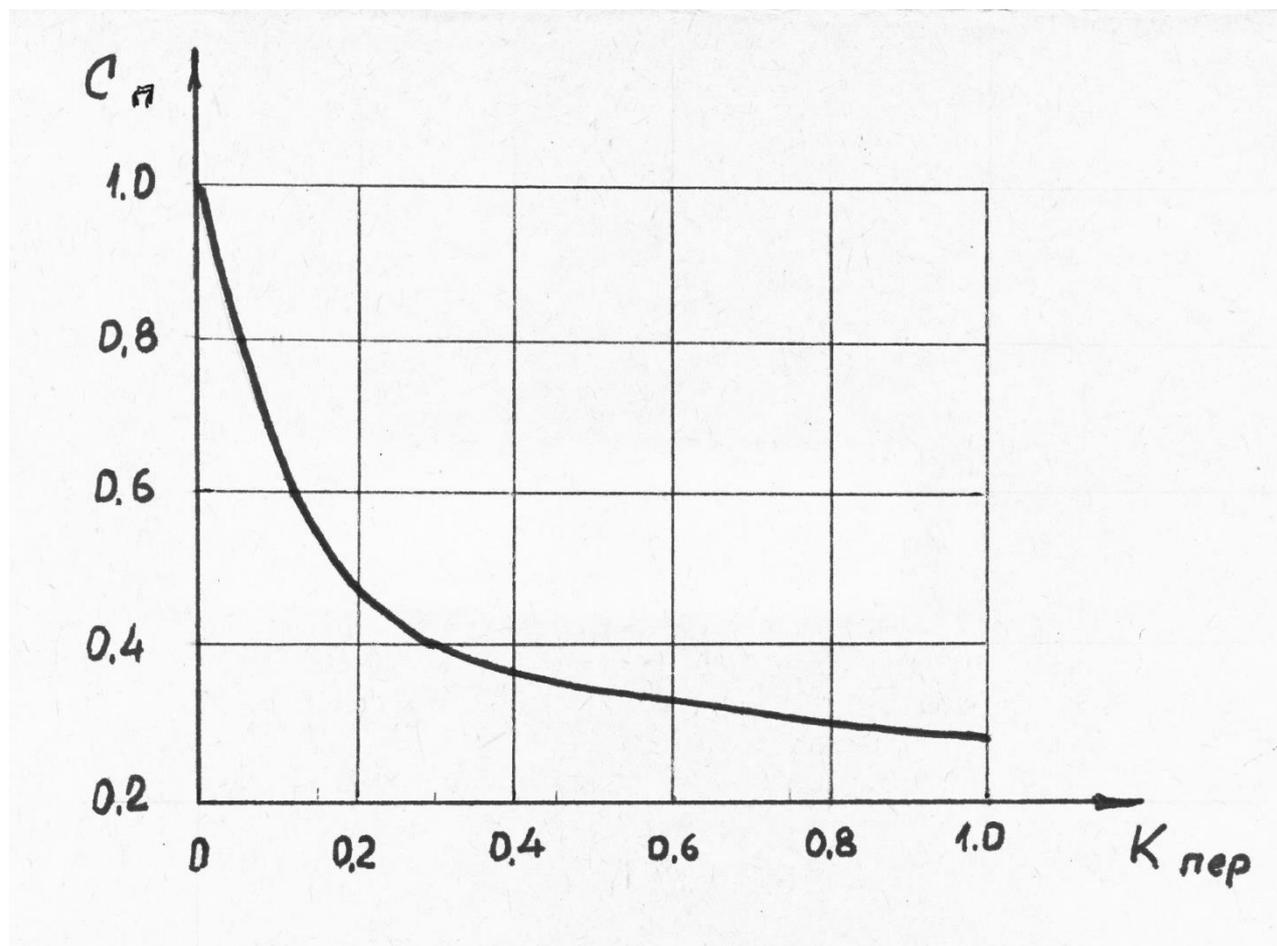
$$K_{\text{пер}} = S_{\text{вх}} / L_1 L_2 ;$$

$$K_{\text{пер}} = 0,05 \dots 0,1 ;$$

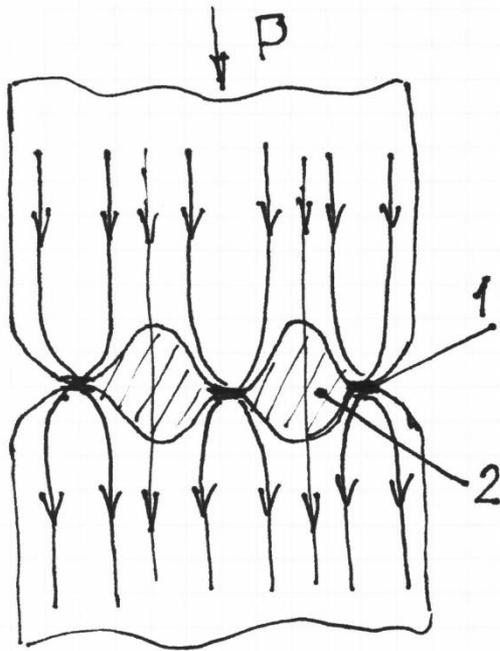
$$S_{\text{вых}} = (1,2 \dots 1,5) S_{\text{вх}} ;$$

$$\Delta t_{\text{к пер}} = c_{\text{п}} \Delta t_{\text{к}}$$

# Учет перфорации корпуса



# Проводимость контакта



54

$$\sigma_k = \sigma_m + \sigma_c$$

$$\alpha_M = \frac{2,12 \lambda_M^* \eta}{\varphi} \cdot 10^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$$

$$\lambda_M^* = 2 \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)$$

$$\eta = \frac{S_{\text{фк}}}{S_k}$$

$$\varphi = 1 - 1,41 \eta^{\frac{1}{3}} + 0,3 \eta^{\frac{3}{2}}$$

$$\frac{\eta}{\varphi} = (PB/E)^{0,8}$$

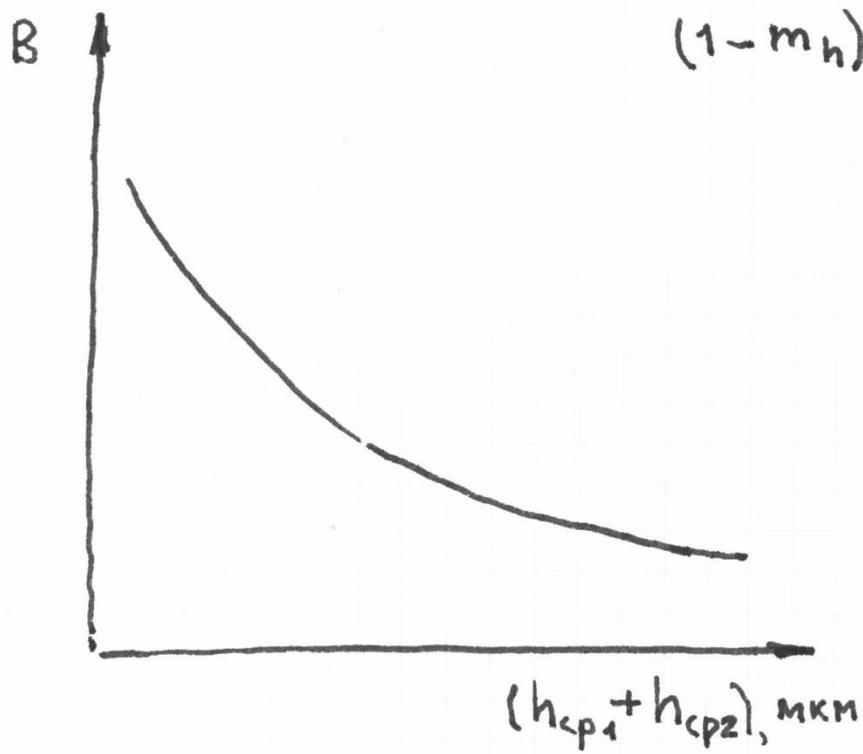
$$\alpha_M = 2,12 \lambda_M^* (PB/E)^{0,8} \cdot 10^4, \quad \frac{Вт}{м^2 \cdot 0с} \quad 95$$

$$\alpha_c = \lambda_c / \delta_{экр}$$

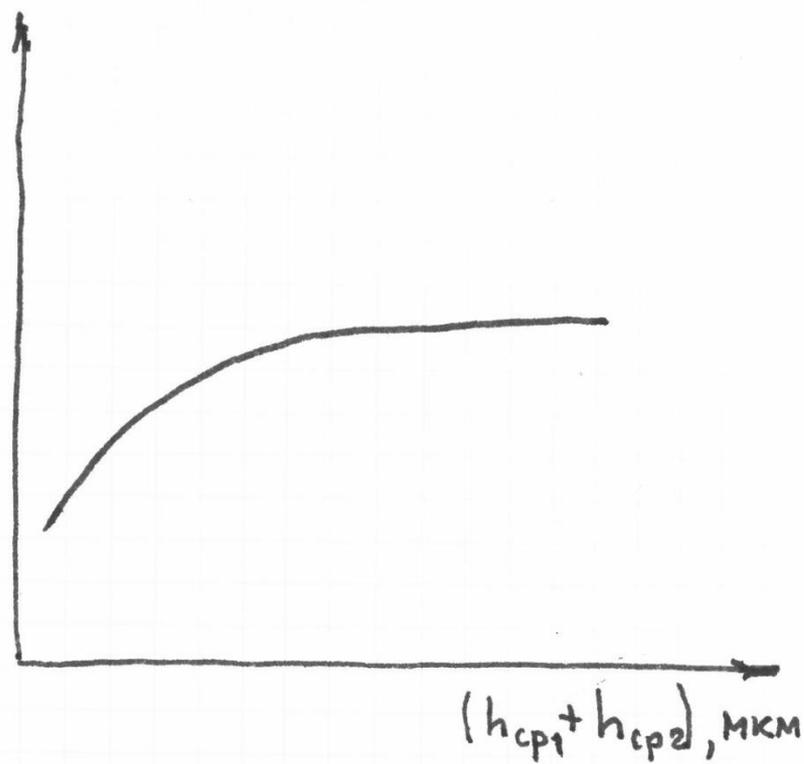
$$\delta_{экр} = (h_{ср1} + h_{ср2}) (1 - m_h)$$

$m_h$  - коэффициент заполнения  
профиля неровностей.

$(1 - m_h)$  - по графику



$(1 - m_h)$

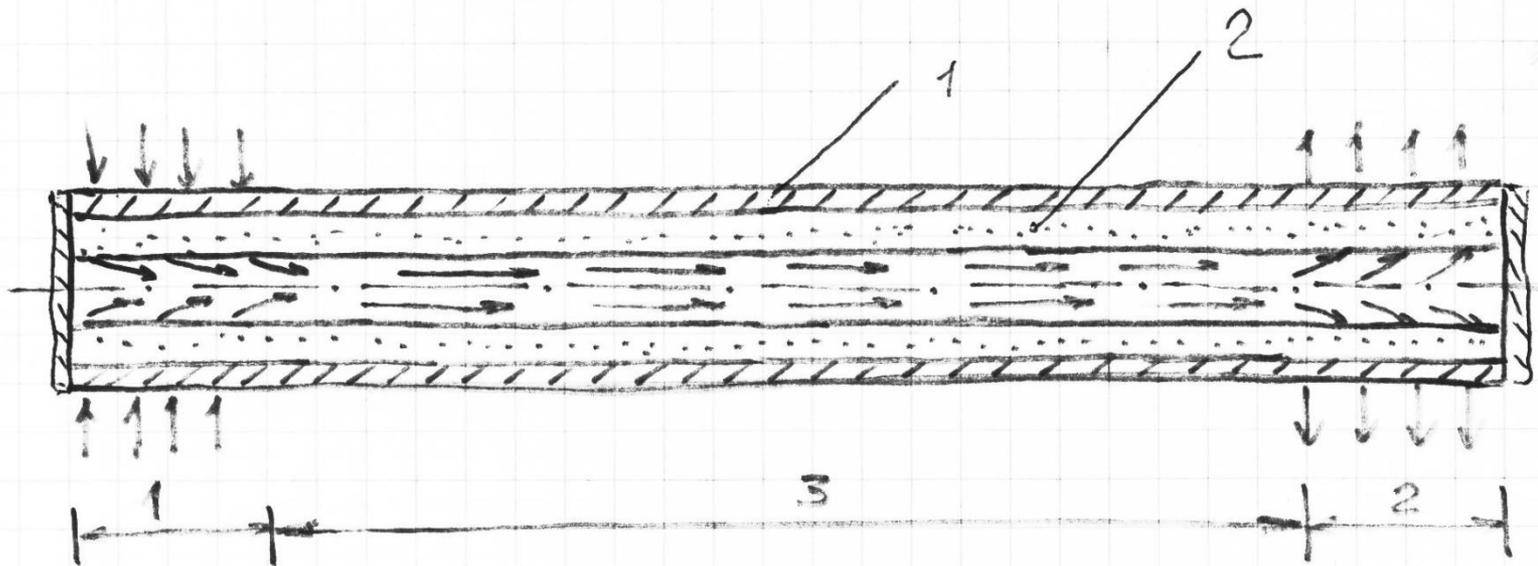


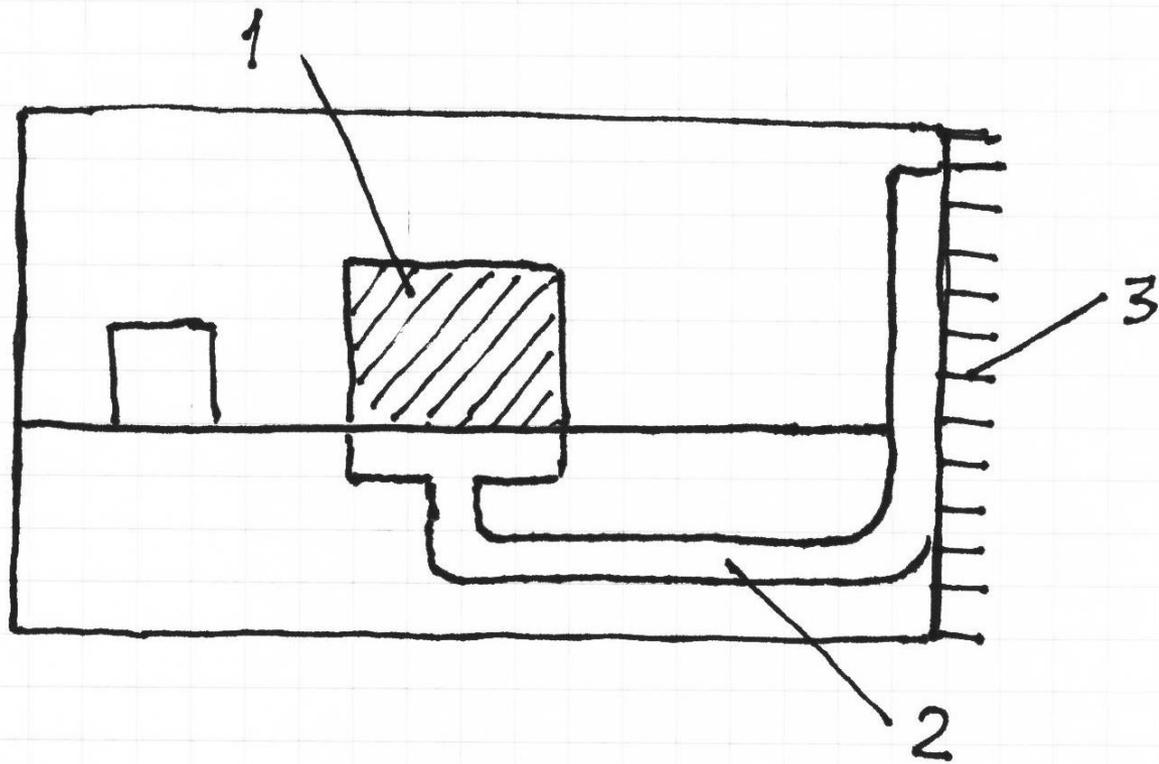
Материал контактной пары	$\sigma_{\text{уд}} \cdot 10^{-4} \frac{\text{ВТ}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с}}$
Медь - алюминий	12,5
Медь - медь	10,0
Медь - латунь	5,5
Медь - сплав Д16Т	5,0
Сплав Д16Т - сплав Д16Т	4,0
Сталь - сплав Д16	0,83
Сталь - медь	1,2
Сталь - сталь	1,5
Сталь - сталь (резьба)	0,17
Металл - краска - металл	0,05
Металл - стекло	3 - 6,4

$$P = 2000 \text{ Н/см}^2, R_z = 20$$

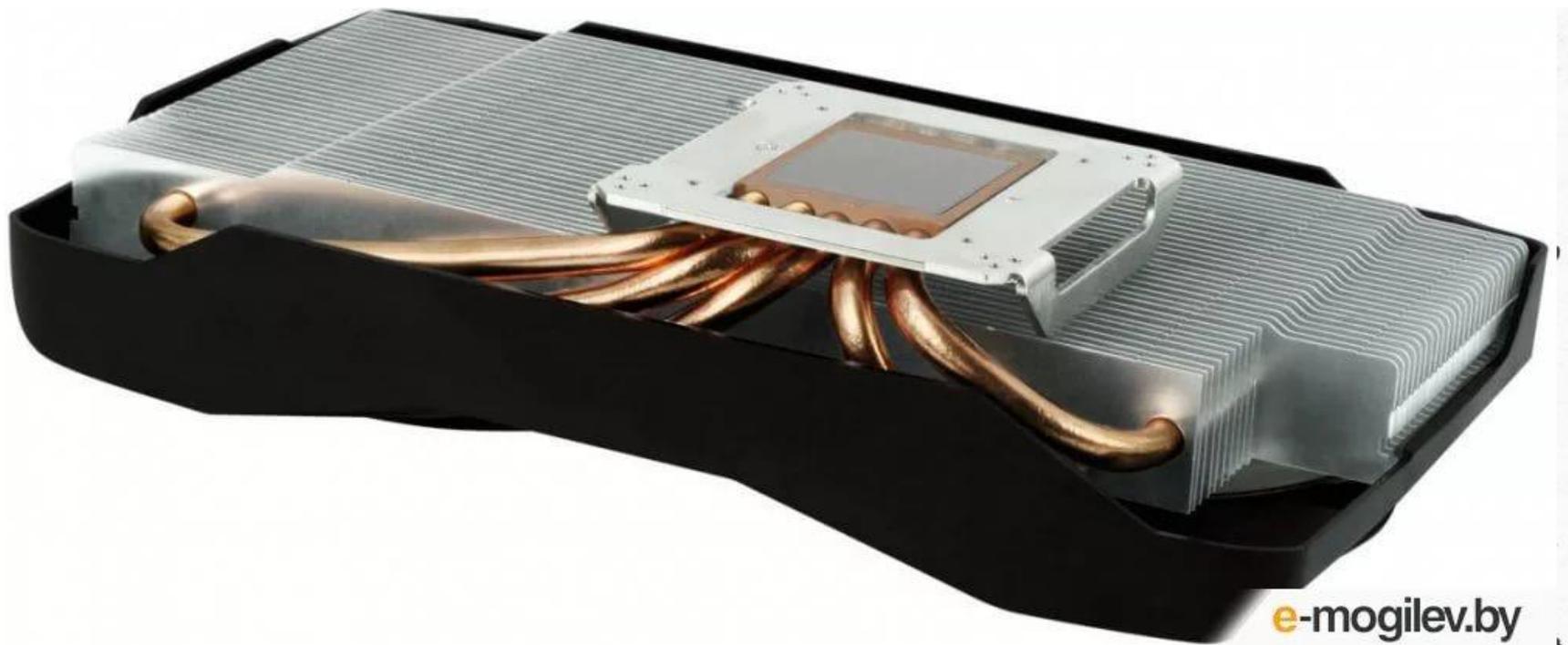
# Испарительные системы

Тепловые трубы













# Расчёт испарительных систем

Теплообмен при испарении

$t_n$  - температура насыщения

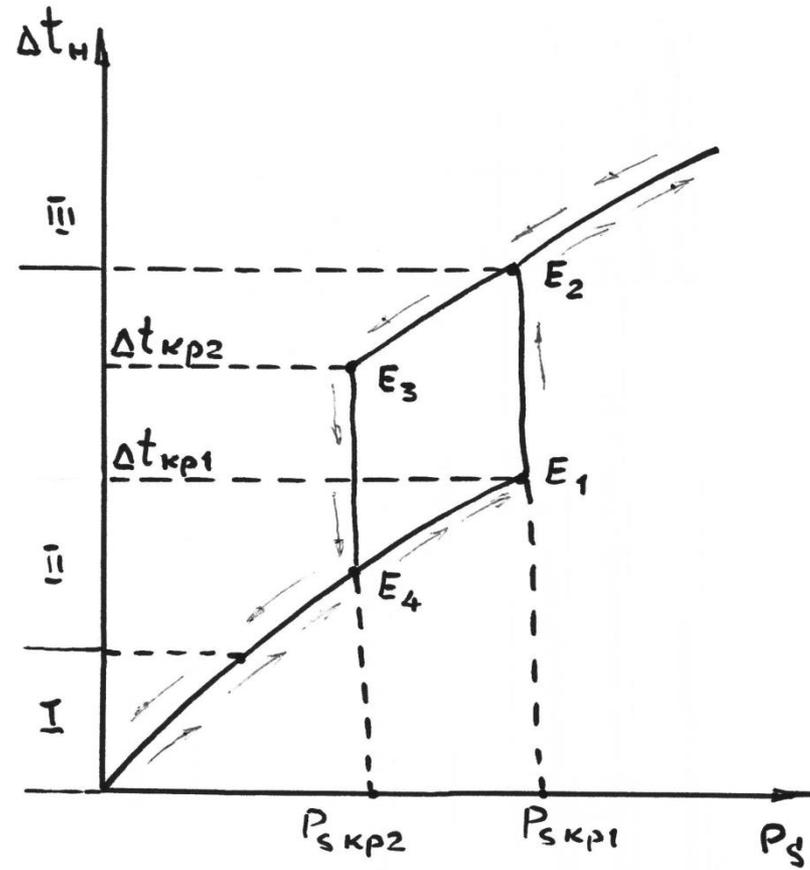
Виды кипения: пузырьковое и пленочное

$\Delta t_n = t_{ст} - t_n$  - температурный напор

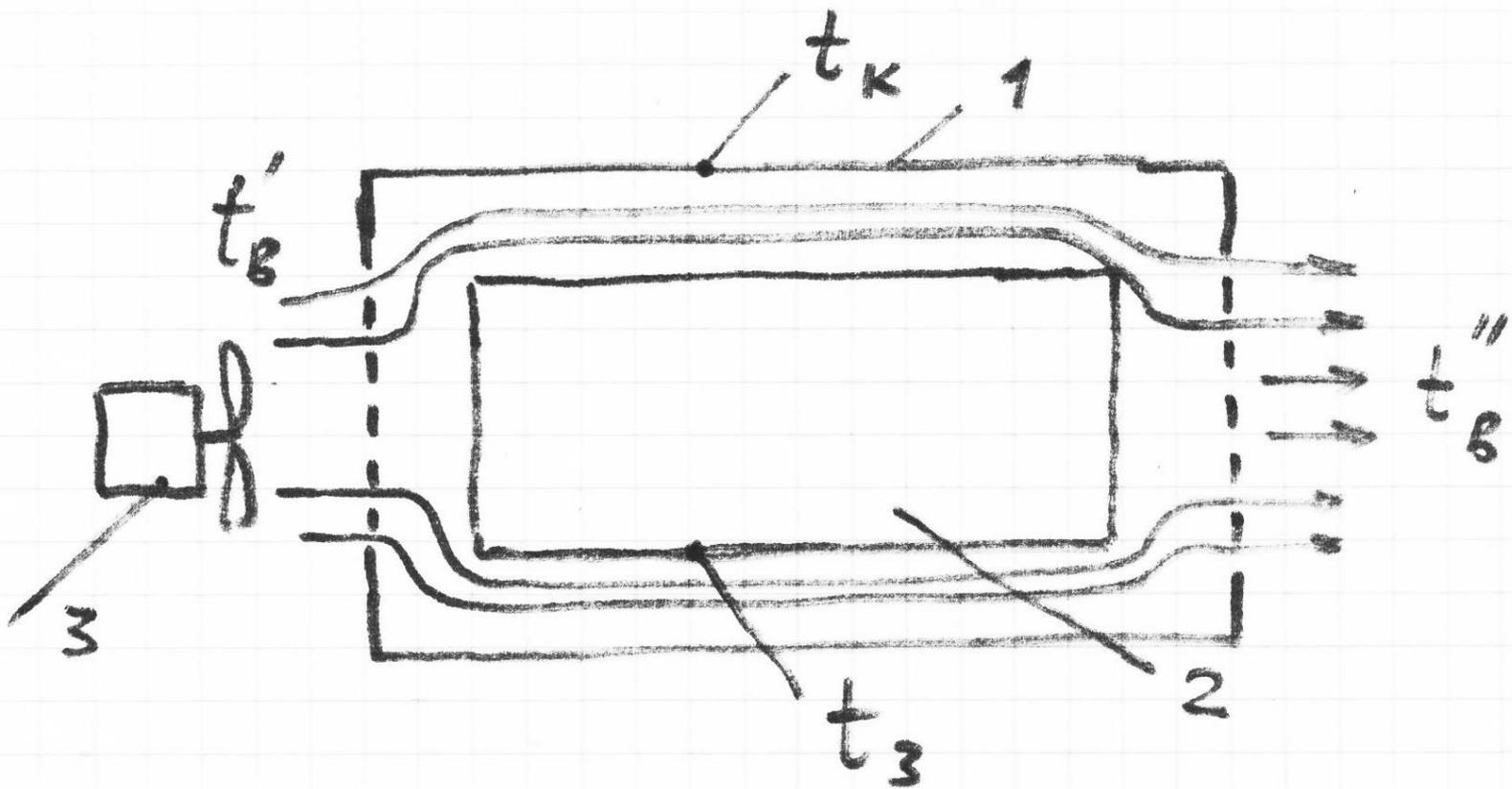
$$\alpha_n = B \cdot P_s^{0,666}$$

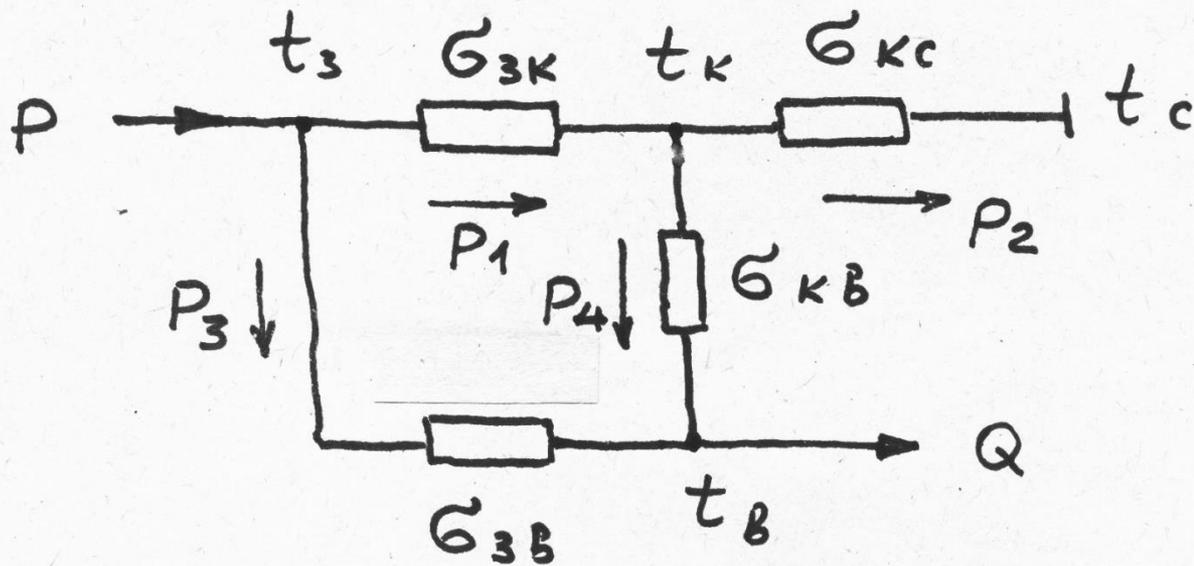
$$\Delta t_n = t_{ст} - t_n = \frac{P_s}{\alpha_n} = \frac{P_s^{0,333}}{B^{0,666}}$$

$$B = 0,075 \left[ 1 + 10 \left( \frac{1}{P_{ж}/P_n - 1} \right)^{0,666} \right] \times$$
$$\times \left( \frac{\lambda_{ж}^2}{\nu_{ж} \sigma_n T_n} \right)^{0,333}$$



# Принудительная вентиляция





Геометрические размеры,  $t'_B$ ,  
 $B$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  ;

Неизвестные:  $t_3, t_K, t_B''$

$$P = P_1 + P_3$$

$$P_1 = P_2 + P_4$$

$$P = \sigma_{3K} (t_3 - t_K) + \sigma_{3B} (t_3 - t_B).$$

$$\sigma_{3K} (t_3 - t_K) = \sigma_{KC} (t_K - t_C) +$$

$$+ \sigma_{KB} (t_K - t_B);$$

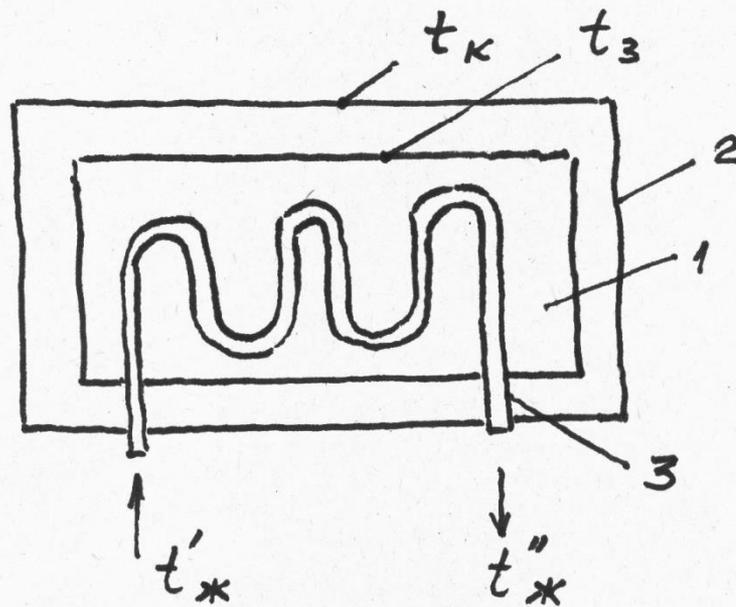
$$t_B = 0,5(t_B' + t_B'')$$

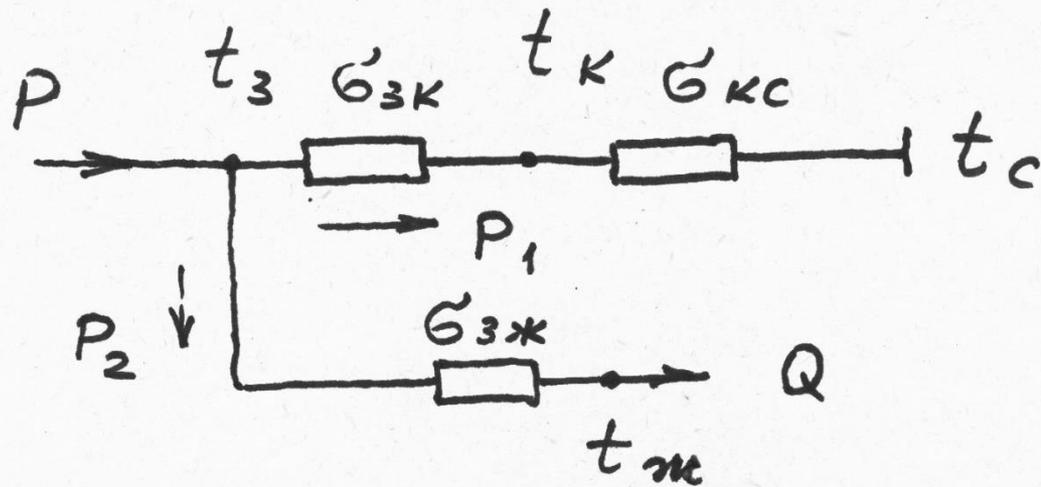
$$P - \sigma_{\kappa c} (t_{\kappa} - t_c) = \sigma_B (t_B'' - t_B')$$

$$\sigma_B = c_p \rho B ;$$

# Жидкостное охлаждение

Тепловая модель конструкции  
с принудительным жидкостным  
охлаждением





$$t_* = (t'_* + t''_*) / 2$$

$$P = P_1 + P_2$$

$$P_1 = \sigma_{3к} (t_3 - t_к) = \sigma_{кс} (t_к - t_с)$$

$$P_2 = \sigma_{3ж} (t_3 - t_{нс})$$

$$P - P_1 = P_2 = \sigma_{ж} (t''_{нс} - t'_{ж})$$

$$\sigma_{ж} = c_p \rho V$$

# Способы улучшения теплового режима

1. Применить более эффективную систему охлаждения  
естеств. вент-> прин. вент->кондуктивная->жидкостная-> испарительная
2. Изменить тепловую схему, заменяя на отдельных участках более эффективные способы передачи тепла ( кондукцию, испарительные трубки)
3. Увеличить площадь поверхности блока
  - а) увеличить размеры
  - б) применить оребрение корпуса (корпус как радиатор)
4. Увеличить зазоры корпус-ячейки и между ячейками
5. Отдельные компоненты с большим тепловыделением установить на радиатор (процессор, ИС стабилизатора, мощные транзисторы, диоды)
6. Тепловыделяющие элементы устанавливать на радиатор с применением теплопроводящей пасты
7. Применить перфорацию корпуса, кожуха
8. Заменить элементы с низкой  $T_{\max}$  (повысить допустимый перегрев  $\Delta T_{\text{доп}}$ )
9. Применить системотехнические и схемотехнические решения уменьшения выделяемого тепла :
  - для заданной дальности  $\downarrow P$  передатчика локатора  $\uparrow$  чувствительность
  - импульсный стабилизатор питания вместо компенсационного
  - усилитель класса А-> В -> С -> D