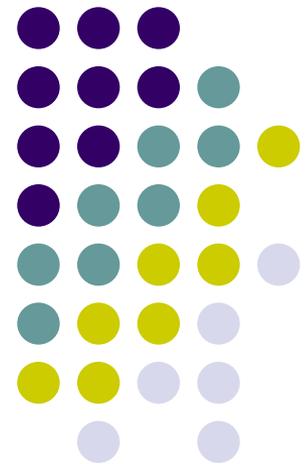


ЛЕКЦИЯ 3

Теплопритоки к жидкому
хладагенту.

Теплоподвод за счет
теплопроводности твердых тел





Общие закономерности

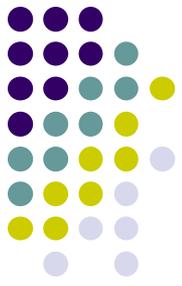
Подводимая тепловая мощность за счет теплопроводности твердого тела в одномерном случае определяется **законом Фурье**:

$$Q = \frac{F}{l} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT$$

l – длина теплопровода;

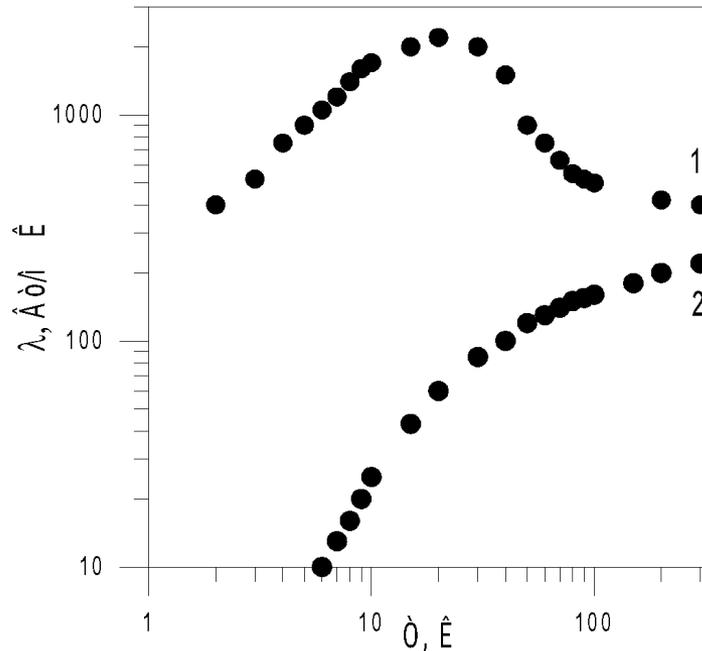
F – поперечное сечение теплопровода;

$\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К).



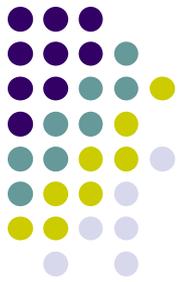
Усреднение коэффициента теплопроводности

Характерной особенностью области низких температур является довольно резко выраженная зависимость коэффициента теплопроводности металлов и некоторых других конструкционных материалов от температуры



Температурная зависимость теплопроводности для двух видов меди.

- 1 – чистая отожженная медь (электротехнические материалы после отжига);
- 2- медь, раскисленная фосфором (техническая медь, обычно используемая в неэлектротехнических изделиях – трубах, листах и т.п.).



Усреднение коэффициента теплопроводности

С целью упрощения расчётов для материалов, применяемых в криогенной технике, приводятся значения средней интегральной теплопроводности в определённых, наиболее часто встречаемых на практике диапазонах температур. Поскольку λ в этом диапазоне температур считается константой, то выражение для вычисления теплопритока упрощается:

$$Q = \bar{\lambda} \frac{F}{l} (T_2 - T_1), [Вт]$$

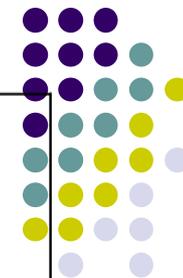
Усреднение коэффициента теплопроводности



Коэффициенты средней интегральной теплопроводности

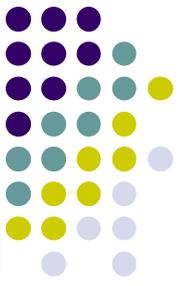
Материал	Коэффициент теплопроводности λ [Вт/(см · К)] для интервала температур		
	4.2 – 78 К	4.2 – 20.4 К	20.4 – 78 К
Медь отожжённая	4.002	2.177	4.522
Медь неотожжённая	3.429	1.499	3.94
Нержавеющая сталь	0.0486	0.01195	0.0586

Теплопроводность λ , Вт/м К, некоторых металлов и припоев



T, К	Медь МЗ неотожженная	Медь МЗ отожженная	Лагунь ЛС59-1 (поставка)	Лагунь Л-68	Бронза БрБ2 отожженная	Константан	Нержав. сталь 18Х18Н10Т	Припой Рb40-Sn60	Сплав Вуда
2	250,	50,0	1,3	-	1,38	-	-	-	0,90
3	38,0	60,0	2,09	-	1,88	-	-	10,0	2,1
4	45,0	75,0	2,90	-	2,3	0,80	0,48	18,0	4,00
5	55,0	90,0	3,70	-	2,60	1,20	0,68	20,0	5,40
6	60,0	110	4,60	-	2,89	1,60	0,90	24,0	7,10
7	75,0	130	5,50	-	3,29	2,20	1,10	30,0	8,80
8	85,0	218	6,4	-	3,89	2,60	1,40	32,0	9,80
9	105	237	7,30	-	4,45	3,10	1,60	39,0	10,0
10	110	251	8,20	-	5,02	3,50	1,80	40,0	11,0
15	200	320	13,0	-	1,95	6,15	3,15	47,0	14,5
20	250	357	17,5	-	10,9	8,80	4,50	54,0	18,0
25	300	382	21,5	-	13,4	10,0	5,70	53,5	18,5
30	350	401	25,5	-	16,3	11,2	7,00	53,0	19,0
40	400	429	33,1	-	21,3	13,0	8,80	51,0	20,0
50	420	451	40,0	-	26,4	14,5	10,0	50,0	20,5
80	498	500	53,2	71,0	37,2	18,0	16,0	49,0	22,5
100	-	-	-	73,2	-	18,0	-	49,0	24,0
120	-	-	-	77,8	-	18,0	-	-	-
150	418	-	-	83,7	-	18,0	-	-	-
200	405	-	-	94,1	-	19,7	-	-	-
250	394	-	-	102	-	21,3	-	-	-
293	387	-	-	109	-	22,7	-	-	-
300	386	-	123	110	-	23,0	22,0	-	-

Методы уменьшения теплопритока за счет теплопроводности твердых тел



- применение тонкостенных (0.2-0.5 мм) трубок из металла с малой теплопроводностью – нержавеющей стали;
- замыкание трубы подвеса гелиевой емкости на азотоохлаждаемую втулку;
- охлаждение трубки подвеса выходящим потоком холодных паров гелия;
- для уменьшения теплоподвода по электрическим проводам желательно использовать провода с малой теплопроводностью (манганин, константан, нихром), а для медных проводов выбирать возможно меньшие сечения. Длину проводов рекомендуется брать большой, до нескольких метров, наматывая часть провода на охлаждаемые азотом тепловые якоря.

При расчетах теплового потока по тонкостенным трубкам площадь поперечного сечения трубки равна $F = \pi Dh$, где D - диаметр трубки, h – толщина трубки.

Расчет теплового потока в случае переменного сечения

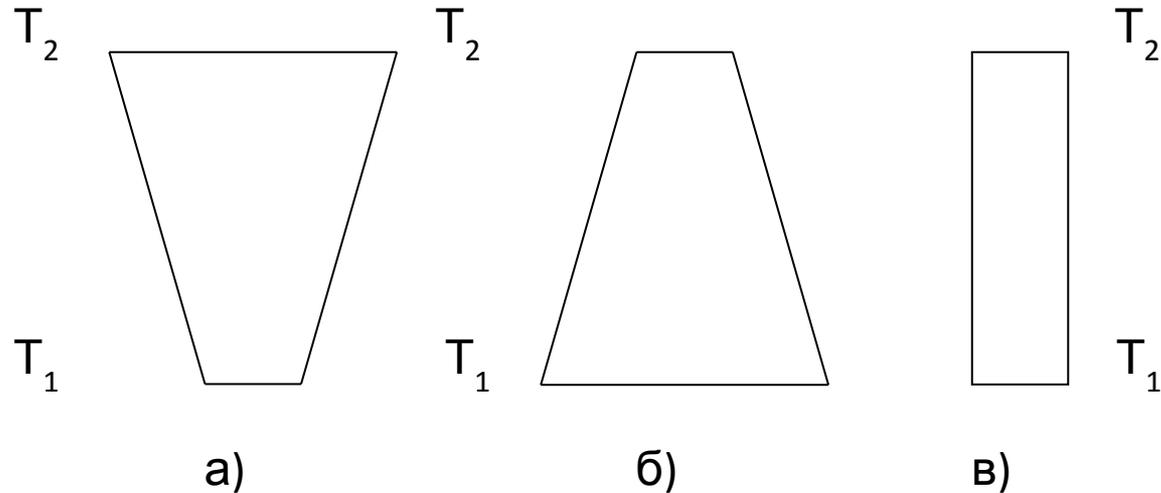
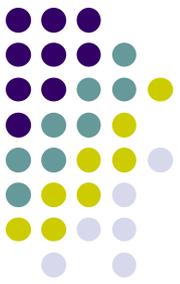


Иллюстрация к расчету теплового потока по стержню переменного сечения

Тепловые потоки в случаях а) и б)
эквивалентны и равны потоку в случае в)

Расчет теплового потока в случае переменного сечения



Тепловой поток Q вдоль стержня в любом его сечении при отсутствии бокового теплоотвода постоянен, т.е.

$$Q = -\lambda(T) F(x) \frac{dT}{dx} = const$$

Разделив переменные, получим

$$Q \frac{dx}{F(x)} = -\lambda(T) dT$$

Интегрируя в пределах стержня (по x – от x_1 до x_2 , по T – от T_1 до T_2), получим:

$$Q = - \frac{\int_0^{T_2} \lambda dT - \int_0^{T_1} \lambda dT}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{F(x)}}$$

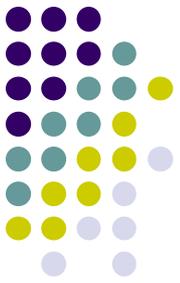
Расчет теплового потока в случае переменного сечения



Так как интеграл от теплопроводности по температуре является свойством материала, а знаменатель лишь интегрально зависит от формы сечения, легко понять, что случаи **а)** и **б)** эквивалентны по теплопритоку между собой и, с другой стороны, эквивалентны стержню постоянного сечения **в)**

$$S_{\text{эк}} = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{dx}{F(x)}$$

Расчет теплового потока в случае переменного сечения



Величину иногда называют граничным термическим потенциалом

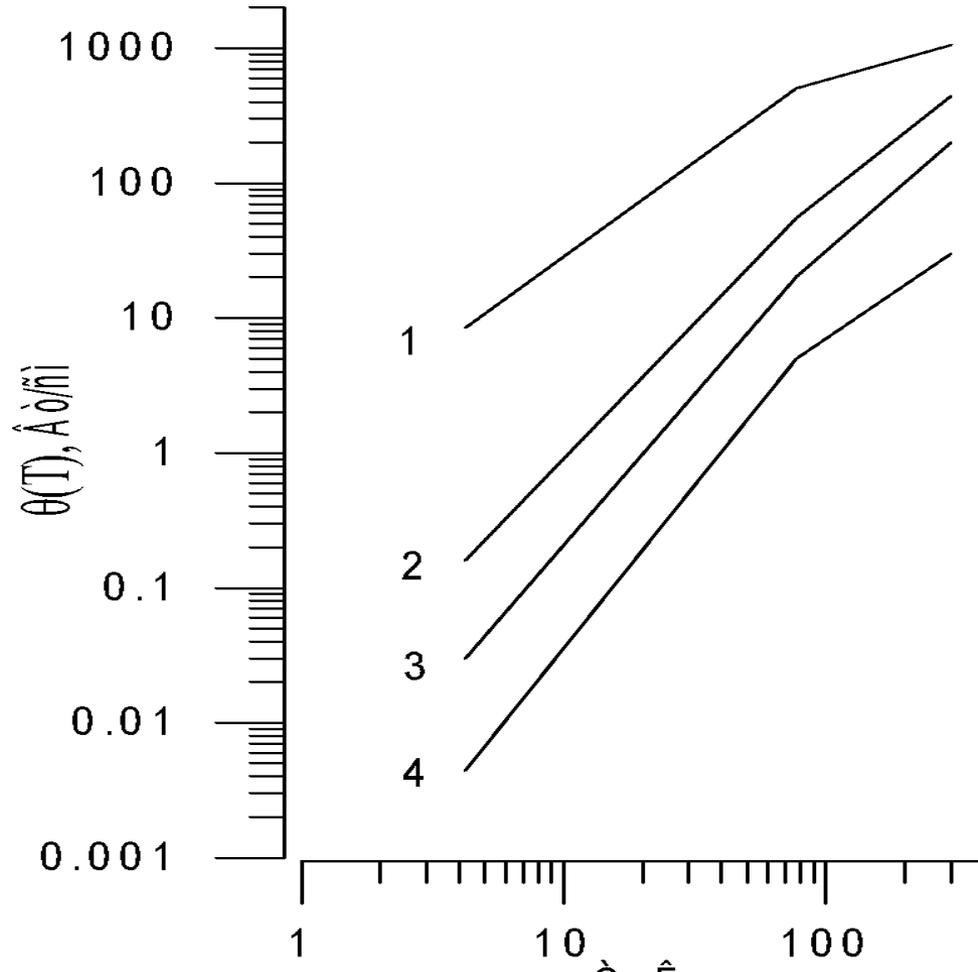
$$\theta(T) = \int_0^T \lambda(T)$$

В окончательном виде формула для расчета теплового потока имеет следующий вид:

$$Q = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{F(x)}}$$

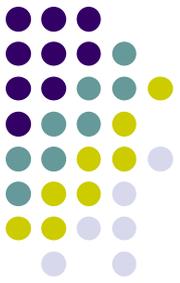
Граничный термический потенциал равен площади под кривой $\lambda(T)$, поэтому на тепловой поток влияет, в основном, тот участок кривой $\lambda(T)$, где **теплопроводность максимальна**.

Расчет теплового потока в случае переменного сечения



Приближенные значения граничных термических потенциалов $\theta(T)$ для 1 – меди электролитической; 2 – меди технической; 3 – латуни; 4 –

Теплоприток по токовводам



закону Видемана – Франца, между теплопроводностью и электросопротивлением существует зависимость вида

$$\lambda(T) \cdot \rho(T) = L_0 T$$

$L_0 = 2.45 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Лоренца, (Вт · Ом)/К².

минимальное количество тепла, попадающего в криостат, зависит не от материала токовводов, а от их формы и размеров при любом заданном значении тока.

Детальные расчеты показывают, что в оптимальных токовводах длина l и сечение S токоввода связаны с рабочим током I_0 универсальным соотношением

$$\frac{l \cdot I_0}{S} = X$$

Теплоприток по токовводам



В оптимальных токовводах длина l и сечение S токоввода связаны с рабочим током I_0 универсальным соотношением

$$\frac{l \cdot I_0}{S} = X$$

где X – форм-фактор, постоянный для любых оптимальных токовводов из данного материала независимо от силы тока.

Для меди с высокой электропроводностью $X = 2.6 \cdot 10^7$ А/м.

Для меди, раскисленной фосфором, которая из-за значительно большего содержания примесей имеет меньшую теплопроводность, в особенности при низких температурах, $X = 3.5 \cdot 10^7$ А/м.

Универсальный критерий оптимальных токовводов: на любом вводе, изготовленном из любого материала, удовлетворяющего закону Видемана – Франца, при оптимальном токе падение напряжения составляет **80 мВ**.