ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ КРИОГЕННЫХ УСТРОЙСТВ

Лекция 3

Теплопритоки к жидкому хладагенту.

1.Теплоподвод за счет теплопроводности твердых тел

1.1Общие закономерности

Перенос тепла в твердых телах теплопроводностью при низких температурах подчиняется известным закономерностям. Подводимая тепловая мощность определяется (в одномерном случае) следующей зависимостью, называемой законом Фурье:

$$Q = \frac{F}{l}\int_{T_1}^{T_2} \lambda(T)dT, \qquad (1)$$

где l – длина теплопровода; F – поперечное сечение теплопровода; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Характерной особенностью области низких температур является довольно резко выраженная зависимость коэффициента теплопроводности металлов и некоторых других конструкционных материалов от температуры. Для примера, на рис. 3.1 представлены температурные зависимости теплопроводности чистой отожженной меди и технической меди.

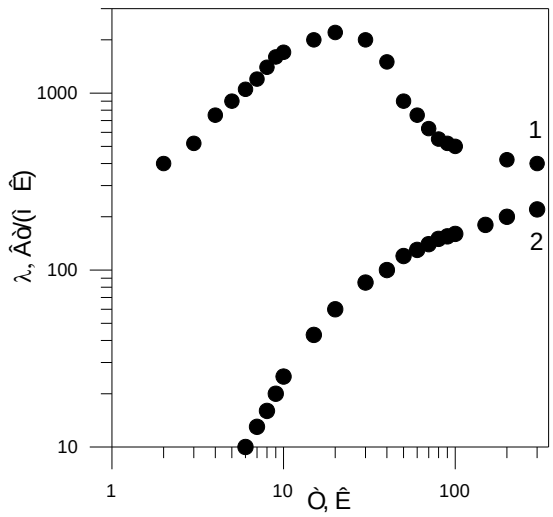


Рис.3.1. Температурная зависимость теплопроводности для двух видов меди. 1 – чистая отожженная медь (эта зависимость типична для электротехнических материалов после отжига); 2 – медь, раскисленная фосфором (техническая медь, обычно используемая в неэлектротехнических изделиях – трубах, листах и т.п.).

Поскольку коэффициент теплопроводности является функцией температуры, вычисление подводимой мощности является достаточно трудной задачей. 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 (1) упрощается:

$$Q = \overline{\lambda}\,\frac{F}{l}(T_2 - T_1)\ , \qquad (2)$$

Коэффициенты средней интегральной теплопроводности некоторых распространенных материалов приведены в табл. 3.1 .

Таблица 3.1

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

Следует отметить, что данные по теплопроводности материалов, приводимые в различных источниках, заметно отличаются. Это объясняется различной дефектностью технических материалов, наличием примесей и т.п. Ниже приведем значения теплопроводности материалов, наиболее часто используемых в криогенной технике (см. табл. 3.2).

Таблица 3.2

Теплопроводность λ [Вт/(м·К)] *некоторых металлов и припоев*

T, К	Медь М3 неотожжен	Медь М3 отожженна	Латунь ЛС59-1	Латунь Л-68	Бронза БрБ2	Константан	Нержав. сталь	Припой Pb40-Sn60	Сплав Вуда
2	25,0	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	-	7,95	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	-	-

Для уменьшения притоков тепла за счет теплопроводности горловины криостатов применяют тонкостенные (0,2–0,5 мм) трубки из металла с малой теплопроводностью – нержавеющей стали. Рекомендуется замыкать трубы подвеса гелиевой емкости на азотоохлаждаемую втулку. Тогда притоки тепла на участке горловины воспринимаются

сначала жидким азотом, а затем жидким гелием, что уменьшает испаряемость более холодной жидкости. Определенная доля притоков тепла по трубе подвеса отводится также выходящим потоком холодных паров гелия, что снижает приток тепла к жидкости. При расчетах теплового потока по тонкостенным трубкам нет необходимости вычислять площадь поперечного сечения трубки как разность площадей, соответствующих внешнему и внутреннему диаметрам. С хорошей точностью искомая площадь $F=\pi Dh$, где D – диаметр трубки, h – толщина трубки.

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 (т.н. тепловое заземление).

1.2. Расчет теплового потока в случае переменного сечения

В ряде конструкций низкотемпературных устройств используются тепловые мосты в форме стержня переменного сечения. Рассмотрим вопрос о влиянии формы стержня с градиентом тепла от теплого (температура T_2) до холодного (T_1) конца стержня. В частности, выясним, в каком из случаев, показанных на рис. 3.2, тепловой поток минимален (при одинаковом материале стержня).

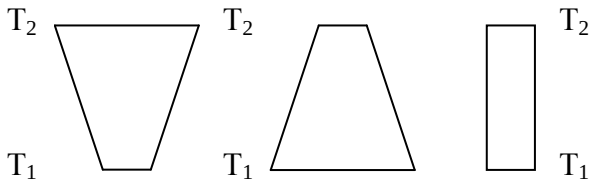


Рис. 3.2. Иллюстрация к расчету теплового потока по стержню переменного сечения

Рассмотрение, приведенное ниже, называется теоремой Гарвина.

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

$$Q = -\lambda(T)\,F(x)\frac{dT}{dx} = const. \qquad (3)$$

Разделив переменные, получим

$$Q\frac{dx}{F(x)} = -\lambda(T)dT. \qquad (4)$$

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

$$Q = -\frac{\int_0^{T_2}\lambda dT - \int_0^{T_1}\lambda dT}{\int_{x_1}^{x_2}\frac{dx}{F(x)}} \ . \qquad (5)$$

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):

$$S_{эк} = \frac{1}{l}\int_0^l \frac{dx}{F(x)}. \qquad (6)$$

Величину $\theta(T) = \int_0^T \lambda(T)$ иногда называют граничным термическим потенциалом.

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

$$Q = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\int_{x_1}^{x_2}\frac{dx}{F(x)}}. \qquad (7)$$

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

На рис. 3.3. приведены приближенные зависимости граничных потенциалов от температуры для некоторых материалов.

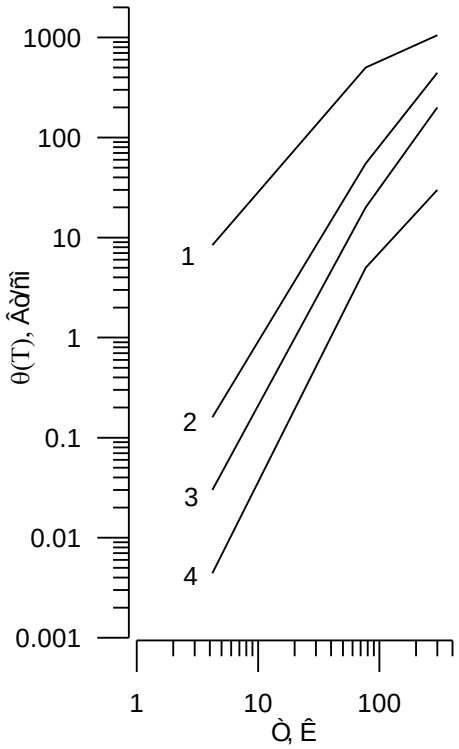


Рис.3.3. Приближенные значения граничных термических потенциалов $\theta(T)$ для 1 – меди электролитической; 2 – меди технической;

Уравнением (7) можно воспользоваться для вычисления теплового потока по проводнику, если известны граничные потенциалы на его концах. В качестве примера использования приведенной выше теоремы рассмотрим тепловой поток по стержню, изображенному на рис. 3.4а, коэффициент теплопроводности которого зависит от температуры.

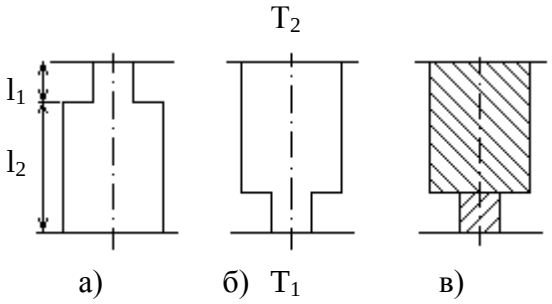


Рис.3.4. Расчет притока тепла за счет теплопроводности стержня переменного диаметра

Применив уравнение (7), находим, что тепловой поток

$$Q = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\frac{l_1}{F_1} + \frac{l_2}{F_2}}. \qquad (8)$$

Подставляя в эту формулу значения θ_1 и θ_2 , найденные по кривым, аналогичным изображенным на рис.3.3, можно вычислить величину теплового потока *Q*. Из того факта, что тепловой поток в стержне определенной геометрической формы зависит только от граничных термических потенциалов на его концах, следует несколько выводов, которые могут оказаться полезными при создании низкотемпературных установок. В частности, при взаимной замене температур на концах стержня изменяется только направление, но не величина теплового потока. Например, тепловые потоки в стержнях, показанных на рис. 3.4, а и б, как и на рис. 3.2, будут одинаковы. Еще раз напомним, что тепловой поток в стержне определенной формы пропорционален площади под кривой зависимости коэффициента теплопроводности от температуры. Таким образом, небольшие интервалы *T* с очень маленькими значениями *λ(T)* лишь слегка уменьшат тепловой поток. Вместе с тем небольшие интервалы *T* с очень большими значениями *λ(T)* внесут в тепловой поток значительный вклад. Необходимо всегда четко представлять, в каких условиях справедлива рассмотренная теорема. Уравнение (7) применимо к проводникам тепла, теплопроводность которых является функцией только температуры, т.е. к телам из однородных материалов. Если теплопроводность зависит также и от положения, например для комбинированных или неизотропных тел (см. рис. 3.4,в), то эта теорема неприменима. Кроме того, эта теорема, разумеется неприменима и при заметном охлаждении стержней испарившимся хладагентом, когда нельзя считать тепловой поток вдоль стержней постоянным.

1.3. Теплоприток по токовводам

В различных низкотемпературных устройствах достаточно часто применяются сильноточные токовводы. Например, сверхпроводящие магниты обычно запитываются током от источника, который находится при комнатной температуре. Для этих целей применяют выпрямители с транзисторным управлением на выходе или тиристорным на входе. Сила используемого тока зависит от размеров магнита и может изменяться в пределах от 30 А в случае небольших соленоидов, предназначенных для научных исследований, до 10^4 А и более для магнитов больших пузырьковых камер или МГД-генераторов. Источник тока подсоединяется к магниту двумя токовводами, один конец каждого из которых находится при комнатной температуре, а другой – при температуре жидкого гелия. Теплоприток в криостат происходит главным образом через токовводы. Именно этот теплоприток

определяет расходы на эксплуатацию магнитной системы, выражаемые либо в расходе жидкого гелия, либо в мощности рефрижератора. Поэтому проблеме токовводов уделяется значительное внимание.

Иногда токовводы можно удалить из криостата после введения в магнит максимального тока. Прежде чем это сделать, необходимо соединить концы обмотки сверхпроводящей перемычкой. В подобной ситуации говорят, что магнит работает в режиме "замороженного тока"; если сопротивление контактов мало, ток будет циркулировать в магните в течение весьма длительного времени без подвода энергии извне. Однако гораздо чаще токовводы постоянно соединены с магнитом, а значит, способствуют значительному дополнительному потоку тепла в гелиевую емкость.

Основная задача при проектировании токовводов заключается в сведении к минимуму теплопритока в криостат при заданном токе в магните. Этот теплоприток имеет две компоненты, одна из которых обусловлена теплопроводностью токовводов, а другая – омическим выделением в них. Поэтому естественно, что теплопроводность и электросопротивление токовводов должны быть минимальными. Однако, согласно закону Видемана – Франца, между теплопроводностью и электросопротивлением существует зависимость вида

$$\lambda(T) \cdot \rho(T) = L_0 T. \qquad (9)$$

где L_0=2.45·10^{-8}– постоянная Лоренца, (Вт·Ом)/К^2. Для большинства металлов и сплавов закон Видемана – Франца выполняется достаточно хорошо, откуда следует, что минимальное количество тепла, попадающего в криостат, зависит не от материала токовводов, а от их формы и размеров при любом заданном значении тока.

Очень важно в максимальной степени использовать весь запас холода, заключенный в жидком гелии, т.е. сконструировать токовводы так, чтобы теплоприток расходовался не только на испарение гелия, но и на изменение энтальпии газа при повышении его температуры до комнатной. Мы уже обсуждали ранее, что при теплопритоке в 1 Дж испаряется 48 мг жидкого гелия, а для нагрева такой же массы газа до комнатной температуры требуется энергия 74 Дж. Поэтому токовводы обычно делают в виде теплообменника, вдоль которого проходит поток холодного газа, снимающего значительную часть тепла как генерируемого в токовводе, так и подводимого за счет его теплопроводности. Детальные расчеты показывают, что в оптимальных токовводах длина l и сечение S токоввода связаны с рабочим током I_0 универсальным соотношением:

$$\frac{l \cdot I_0}{S} = X, \qquad (10)$$

где X – величина, называемая форм-фактором. Этот форм-фактор постоянен 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.

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