

Розділ 4.

Основні принципи конструювання кріогенних установок.

Тема 8.

Гелієвий кріостат і його основні елементи.

Розрахунки основних теплопритоків.

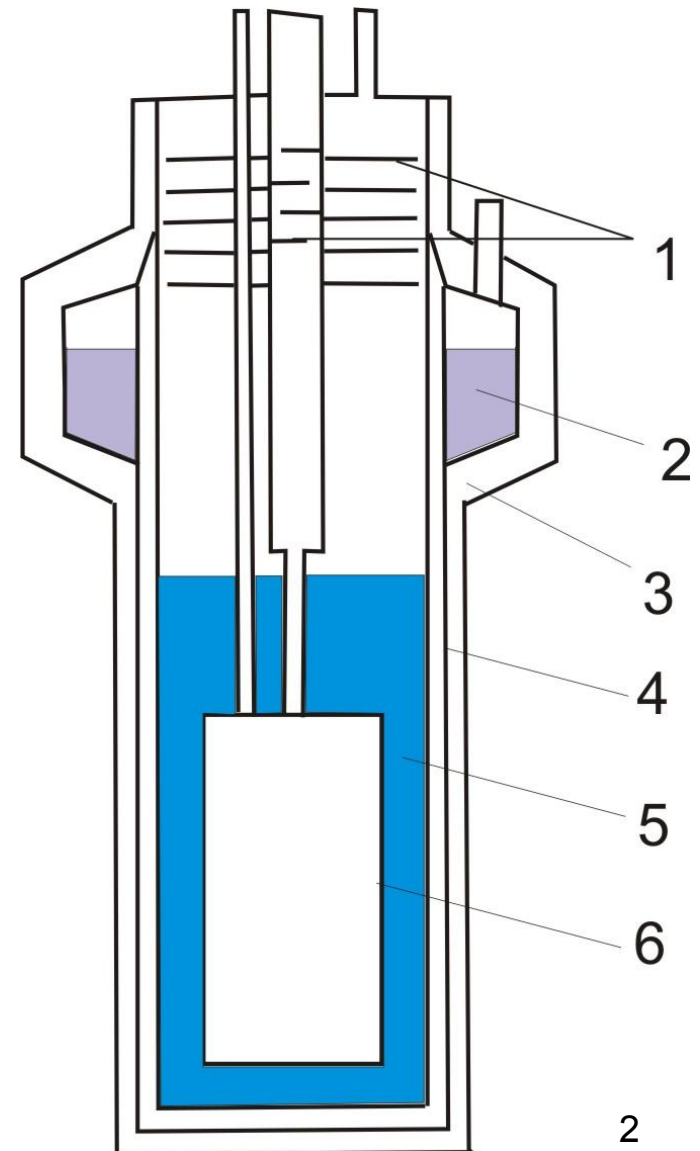
Гелієвий кріостат і його основні елементи.
Основні теплопритоки до кріогенних елементів:
теплопритік по тепловому зв'язку,
теплове випромінювання тіл (закон Стефана-Больцмана),
теплопритік по залишковому газу,
джоулево тепло в проводах з струмом.

Гелиевый криостат для физических исследований

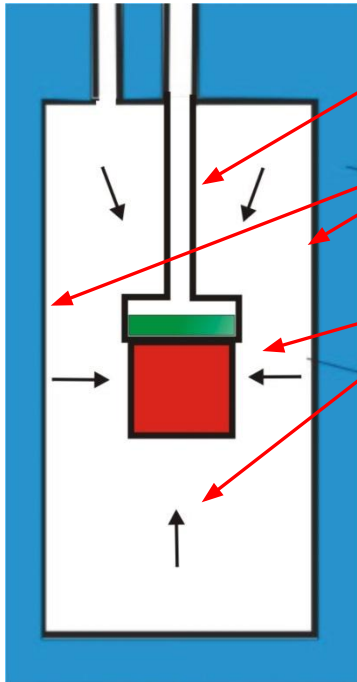
Криостат – устройство, в котором хранится криогенная жидкость и проводятся физические исследования при низких температурах.

Назначение - обеспечить получение и поддержание низкой температуры для изучаемого объекта.

1. радиационные экраны;
2. азотный бачок;
3. вакуумная полость;
4. азотный экран;
5. гелиевая емкость;
6. вакуумная рубашка

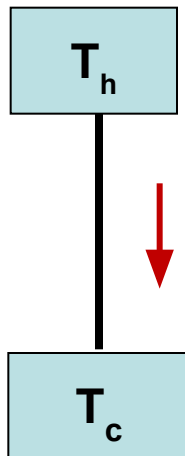
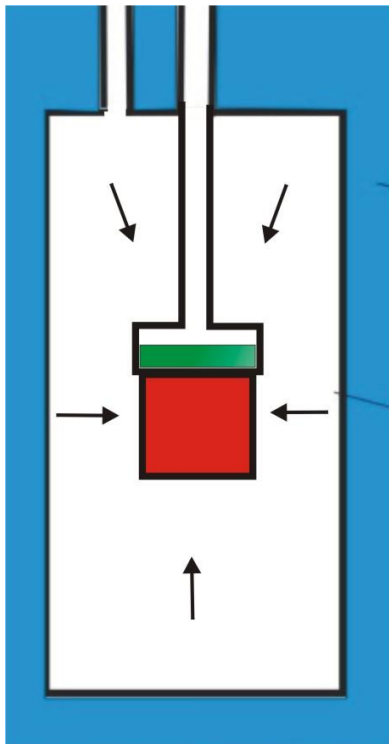


Теплопритоки к образцу при низкой температуре



- 1) Теплоприток по *тепловой связи (трубке)*.
- 2) Теплоприток по *тепловому излучению* (при наличии вакуума).
- 3) Теплоприток по *остаточному газу*.
- 4) Другие типы теплопритока:
 - джоулево тепло в проводах с током
 - теплота адсорбции газов
 - механические вибрации в магнитном поле (вихревые токи, токи Фуко)
 - термоакустические колебания
 - конвективный теплоперенос
 - прочие (измерительная методика, , эл. магнитное излучение, космическое излучение и др.)

Теплоприток по тепловой связи



Если имеется два тела с разной температурой, соединенные тепловой связью и $T_h > T_c$

$$q = -\kappa(dT/dx);$$

$\kappa > 0$ - закон Фурье.

$$q = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{S}$$

тепловой поток
через единицу площади

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = qS = \kappa(T) \cdot S \cdot \frac{dT}{dx}$$

теплоприток по
тепловой связи

$$\dot{Q} = \sum_i \frac{\kappa_i S \Delta T_i}{l}$$

κ_i - удельная теплопроводность [Вт/м·град]
 S - площадь сечения
 l - длина

$$\dot{Q} = \frac{S}{l} \int_{T_1}^{T_2} \kappa(T) dT$$

Интегральная теплопроводность
 $\kappa(T)$ - [Вт/м]

Средний коэффициент κ в интервале $T = 4,2 - 80$ К

нержав. сталь	-	0,045	[Вт/см·К]
константан	-	0,14	[Вт/см·К]
медь	-	9,8	[Вт/см·К]

Для минимизации подвода тепла по стенкам и проводам при конструировании криостата приходится искать компромисс между низкой теплопроводностью и подходящими механическими свойствами материалов.

При возможности используют материалы с неупорядоченной структурой; в металлических криостатах используют сплавы с низкой теплопроводностью, такие как константан (Cu-Ni) или нержавеющая сталь, при этом конструктивные элементы выполняются в виде набора тонкостенных трубок.

Среднее значение коэффициента теплопроводности [Вт/см·К]

Материал	$T_h = 300 \text{ К}$ $T_c = 80 \text{ К}$	$T_h = 300 \text{ К}$ $T_c = 4,2 \text{ К}$	$T_h = 80 \text{ К}$ $T_c = 4,2 \text{ К}$	$T_h = 4,2 \text{ К}$ $T_c = 2 \text{ К}$
Стекло пирекс	0,0082	0,0068	0,0025	0,0007
Нержав. Сталь	0,123	0,103	0,045	0,0022
Инконель	0,125	0,106	0,051	0,003
Нейзильбер	0,20	0,18	0,113	0,005
Константан (манганин)	0,22	0,2	0,14	0,006
Латунь	0,81	0,67	0,26	0,015
Медь (электролитическая)	4,1	4,7	5,8	1
Медь (коммерческая)	1,9	1,6	0,8	0,07

$$Q = \sum_i \frac{\kappa_i S \Delta T_i}{l}$$

$$\bar{k} = \frac{1}{T_h - T_c} \int_{T_c}^{T_h} k(T) dT$$

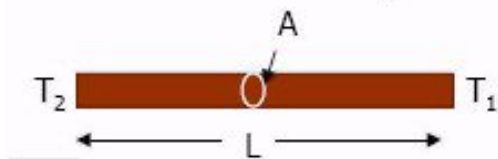
Интегральная теплопроводность

$$\bar{k}(T_1, T_2) = \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT, \text{ [W/m]}$$

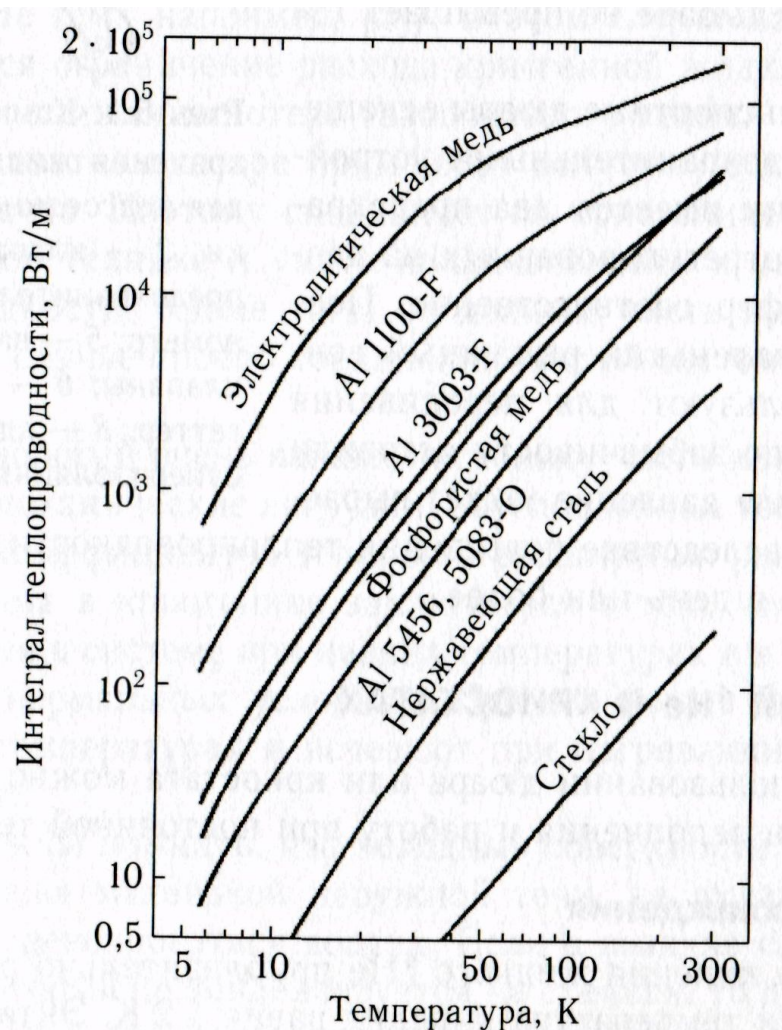
To use the graph

$$\bar{k}(T_1, T_2) = \bar{k}(0, T_2) - \bar{k}(0, T_1)$$

Heat conduction along a rod



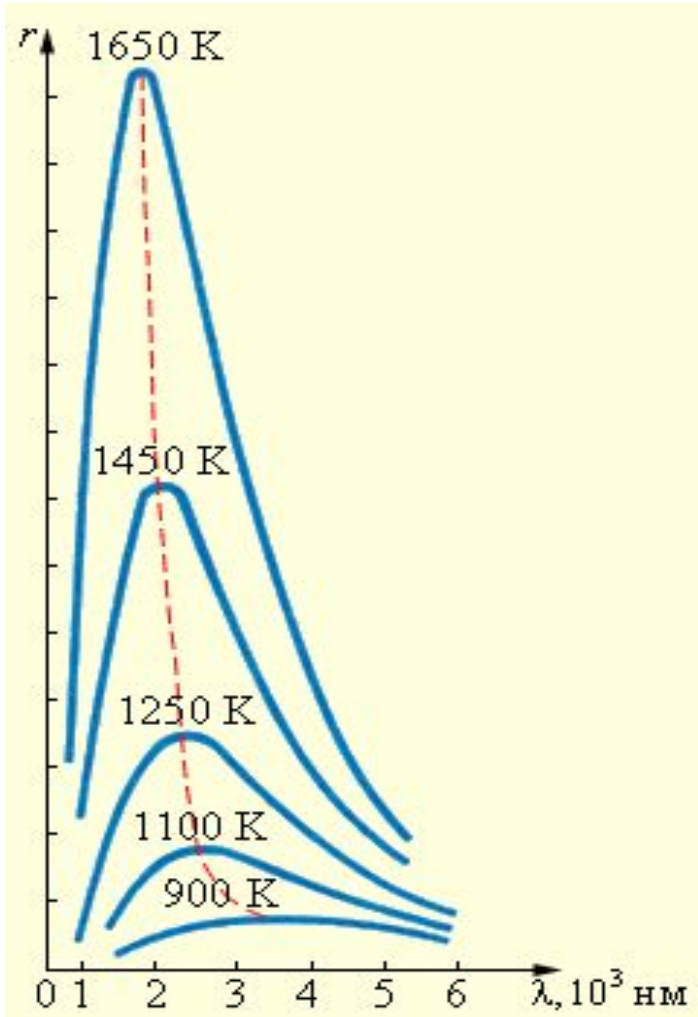
$$Q = \bar{k}(T_1, T_2) \frac{A}{L}$$



Многие материалы можно аппроксимировать как $k \sim T^n$

Теплоприток по тепловому излучению

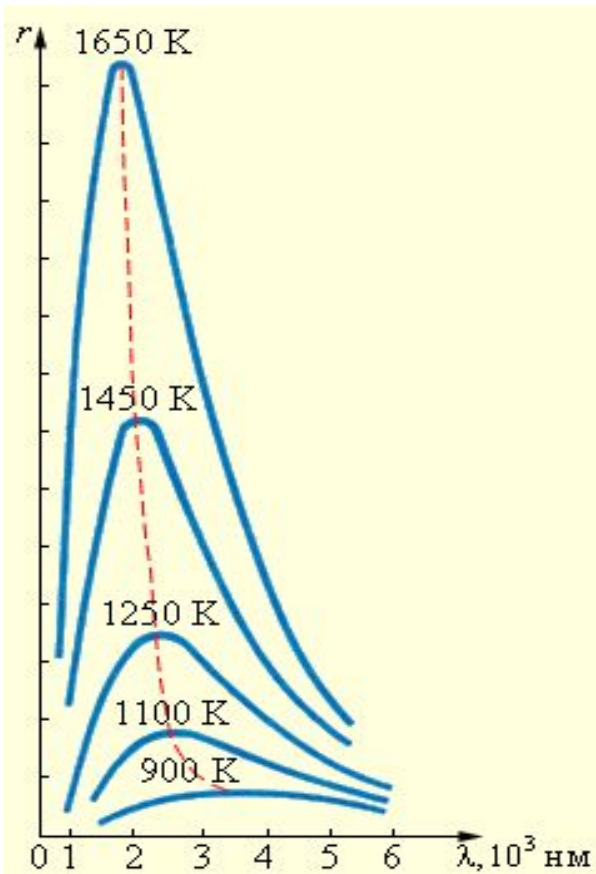
Излучательная способность
(спектральная светимость)



- Все тела не только отражают и поглощают падающее на них излучение, но и сами способны излучать электромагнитные волны
- **Тепловым излучением** называется электромагнитное излучение, испускаемое телами за счет их внутренней энергии.
- Энергия внутренних хаотических тепловых движений частиц непрерывно переходит в энергию испускаемого электромагнитного излучения.
- В обычных условиях, при комнатной температуре ($T=300$ К), тепловое излучение тел происходит в инфракрасном диапазоне длин волн ($\lambda = 10$ мкм), недоступным зрительному восприятию глаза.
- С увеличением температуры светимость тел быстро возрастает, а длина волны в максимуме смещается в более коротковолновую область.
- При температуре в тысячи градусов тела начинают излучать в видимом диапазоне длин волн ($\lambda = 0.4-0.8$ мкм).

Тепловое излучение тел

- **Равновесным тепловым излучением** называют излучение, при котором расход энергии тела на излучение компенсируется энергией поглощенного им излучения для каждой длины волны.
- **Равновесное тепловое излучение не зависит от природы тел, а зависит только от его температуры.**



$$\lambda_{max} \cdot T = const$$

закон смещения Вина

$$const = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Максимум энергии излучения Солнца приходится на $\lambda \approx 0,47 \text{ мкм}$ (зеленая область спектра), что соответствует температуре наружных слоев Солнца $T \approx 6200 \text{ К}$.

Вселенная излучает как абсолютно черное тело с температурой $T = 2,725 \text{ К}$.

Мах спектра излучения $f_{max} = 150,4 \text{ ГГц}$, что соответствует $\lambda_{max} = 1,9 \text{ мм}$ – **реликтовое излучение**. В этом излучении есть небольшая анизотропия.

Тепловое излучение тел

В 1879 году Йозеф Стефан на основе анализа экспериментальных данных пришел к заключению, что **интегральная светимость $R(T)$ абсолютно черного тела** пропорциональна четвертой степени **абсолютной** температуры T :

$$R(T) = \sigma T^4.$$

В 1884 году Л. Больцман теоретически получил эту зависимость из термодинамических соображений.

Численное значение постоянной σ , по современным измерениям, составляет

$$\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К}^4\text{)}.$$

Нагретое тело за счет теплового излучения отдает внутреннюю энергию и охлаждается до температуры окружающих тел.

Холодные тела, поглощая излучение, нагреваются.

Такие процессы, которые могут происходить и в вакууме, называют **радиационным теплообменом**.

Если излучающее тело окружить оболочкой с идеально отражающей поверхностью, то через некоторое время эта система придет в состояние теплового равновесия.

Причина теплового излучения: атомы и молекулы состоят из заряженных частиц, поэтому вещество пронизано электромагнитными полями. При столкновениях атомы переходят в возбужденное состояние, при возврате в основное состояние происходит излучение.

Равновесное тепловое излучение не зависит от природы тел, а зависит только от его температуры.

Тепловое излучение тел

Закон Стефана–Больцмана

Лучистый теплоприток от поверхности с T_1 к поверхности с T_2 :

$$Q = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2}$$

$\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м² · К⁴).

A – площадь поверхности [м²]

ϵ_1 и ϵ_2 – излучательная способность поверхности (от 0 до 1)

ϵ - излучательная способность, коэффициент излучения (теплового излучателя), коэффициент черноты.

Излучательная способность вещества зависит от вида материала, его температуры и состояния поверхности.

ϵ абсолютно черного тела равна 1.

Таблица 6

Материал	Коэффициент излучения при температуре в °К		
	300	78	4,3
Серебро	0,03	0,01	0,005
Медь	0,03	0,019	0,015
Алюминий	0,03	0,018	0,011
Нержавеющая сталь	0,10	0,06	0,034
Углеродистая сталь	0,6	—	—
Стекло	0,94	—	—

Относительная излучательная способность поверхности при данной температуре

$$\varepsilon = \frac{\text{энергия_излучаемая_реальной_поверхностью}}{\text{энергия_излучаемая_черным_телом_при_той_же_температуре}}$$

$\varepsilon \downarrow$ when $T \downarrow$
 $\varepsilon \uparrow$ with the pollution of surfaces
 (oxidation, impurities, traces
 of grease)

**ε – излучательная способность
 вещества**
 (коэффициент излучения, степень черноты)

Материал	Значения ε при температуре (в К)		
	300 К	78К	4,2К
медь (электрически полированная)	0,018	0,015	0,0062
медь (механически полированная)	0,03	0,019	0,015
серебро	0,03	0,01	0,005
алюминий	0,15	0,08	0,04
нержавеющая сталь	0,2	0,12	0,1
углеродистая сталь	0,6	-	-
латунь (полированная)	0,03	0,029	0,018
стекло	0,94	-	-

Тепловое излучение тел

Чтобы сохранять высокую отражательную способность металл следует покрывать позолотой во избежание окисления.

С помощью соотношения

$$Q = \varepsilon \sigma A T^4$$

можно оценить полную мощность, излучаемую поверхностью площадью $A = 1 \text{ см}^2$ при $\varepsilon = 1$.

При $T = 300 \text{ К}$, она составляет 45 мВт,

что в пересчете на жидкий ${}^4\text{He}$ соответствует скорости испарения $70 \text{ см}^3/\text{ч}$.

Для $T = 77 \text{ К}$ эта величина уменьшается до $0,2 \text{ мВт}/\text{см}^2$,

что соответствует расходу гелия $0,3 \text{ см}^3/\text{ч}$.

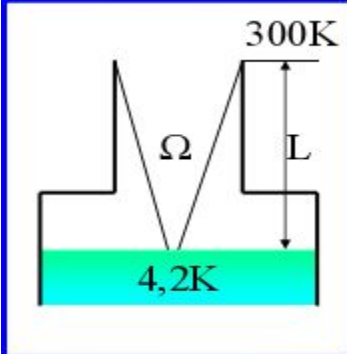
Поэтому части дюзара, охлаждаемые до гелиевой температуры, окружают защитными полированными экранами, находящимся при промежуточной температуре.

Экраны охлаждаются отходящими парами гелия или находятся в хорошем тепловом контакте с резервуаром с жидким азотом.

Для уменьшения радиационного потока в обечайке криостата между холодной и теплой поверхностями размещают многослойные защитные экраны, не имеющие между собой теплового контакта: тонкую ($\sim 4 \text{ мкм}$) металлизированную теплоизоляционную пленку, между слоями которой помещают дополнительный тонкий слой стекловолокна.

Защитные экраны устанавливаются также в горловине дюзара, чтобы перекрыть тепловое излучение в объем криостата от окружающей среды, находящейся при комнатной температуре.

Излучение по горловине



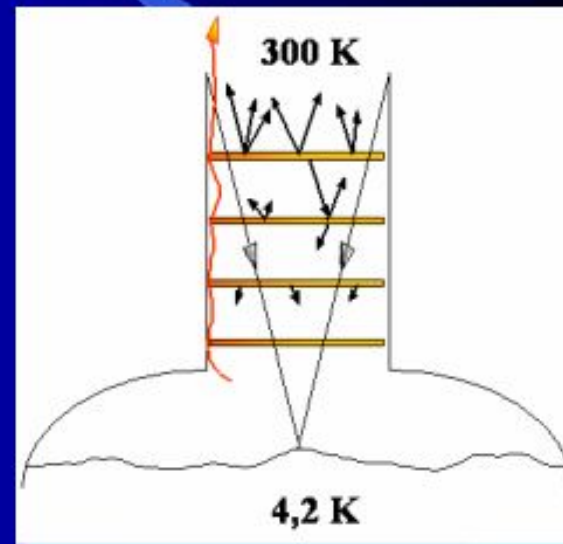
■ We have : $Q_{Rcol} = S \varepsilon_e \sigma T^4 \cdot \Omega$
with $T^4 = 300^4$

$$\Omega = \text{solid angle} = \frac{R^2}{R^2 + L^2}$$

■ Example

- ◆ $\varnothing = 150 \text{ mm}$ then, $S = 180 \text{ cm}^2$
- ◆ $\varepsilon \Omega \sim 0.05$ (typical value)
- $Q_{r_{col}} = 0.38 \text{ watt}$
- high values

- The cover plate radiates directly on the bath
 - ◆ Important losses!
- Solutions
 - Thermal shields distributed along the neck
 - Low emissivity ($\varepsilon < 0.1$)
 - The heat recovered by the shields is evacuated by the vapors



Теплоприток по остаточному газу

При анализе вакуумной системы прежде всего необходимо определить характер движения потока частиц, который может быть установлен на основании величины

Критерия Кнудсена $Kn = \frac{\lambda}{d}$. λ - длина свободного пробега молекулы,
 d - расстояние между поверхностями теплообмена.

$Kn < 0,01$ - непрерывный поток;

$1 > Kn > 0,01$ - смешанный поток

$Kn \gg 1$ - свободно-молекулярный поток

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d^2 P}$$

d - диаметр молекулы

P - давление

При давлениях ниже 10^{-3} мм рт. ст. свободный пробег молекул становится значительно больше расстояний между поверхностями теплообмена.

В этом случае количество переносимого тепла зависит от числа молекул и, следовательно, давления P .

$$\dot{Q}[\text{вт}] = 2435 \cdot a_0 \cdot \frac{(\gamma + 1)}{(\gamma - 1)} \frac{(T_1 - T_2)}{\sqrt{MT}} \cdot P \cdot A [\text{м}^2]$$

a_0 - коэффициент аккомодации, учитывающий неполноту обмена энергией между молекулами газа и поверхностями. Изменяется от 0,2 до 0,95.

При низких температурах приближается к 1.

γ - показатель адиабаты (C_p / C_v)
для воздуха - 1,41

M - молекулярная масса
для воздуха - 29 г/моль

P - давление в мм рт. ст.

A_2 - площадь в м²

Теплоприток по остаточному газу

- Поверхность, находящаяся при температуре 4 К, действует как крионасос для всех газов за исключением гелия.

Когда средняя длина свободного пробега больше размеров контейнера, как это обычно и бывает, то тепловая мощность переносимая газом, может быть оценена как:

$$Q [\text{Вт}] = \text{const} \cdot a \cdot A [\text{см}^2] \cdot p [\text{мбар}] \cdot \Delta T [\text{К}]. \quad \text{const} = \begin{cases} 0,028 & - \text{He} \\ 0,059 & - \text{H}_2 \\ 0,016 & - \text{воздух} \end{cases}$$

В этой формуле a - коэффициент аккомодации газа стенкой.

Это - очень неопределенный параметр, который для гелия и очень чистой поверхности может быть меньше **0,02**.

Заметим, что p в формуле - это давление внутри вакуумной полости, которое отличается от давления, измеренного наружным прибором при комнатной температуре, подсоединенным к вакуумному пространству при низкой температуре.

Если гелий внутри криостата удалось охладить до температур ниже 1 К, то теплоподводом по остаточному газу обычно можно пренебречь.

Приближенные значения коэффициентов аккомодации α

T, К	гелий	водород	воздух
300	0,3	0,3	0,8 – 0,9
78	0,4	0,5	1
20	0,6	1	-