

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Утверждено  
Учебно-методическим управлением МЭИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по курсам  
РЕФРИЖЕРАТОРЫ И ОКЛИЖИТЕЛИ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ  
РАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Москва

1978

## АННОТАЦИЯ

В методических указаниях рассмотрен ряд вопросов, входящих в курсы "Рефрижераторы и компрессоры" и "Низкотемпературное разделение газовых смесей". Методика составления энергетического и эксергетического балансов позволяет проводить анализ криогенных установок различного назначения.

Изложение методики расчета разности температур между потоками в криокомпрессорах и криорефрижераторах дает возможность определения параметров принципиальной схемы установки в зависимости от заданных условий в ступенях использования эффекта охлаждения (СИО), а также в ступенях окончательного и предварительного охлаждения (СОО и СПО).

Дополнительный иллюстрационный материал, включающий ряд диаграмм, номограмм и схем, используется для проведения перечисленных выше расчетов.

---

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНСЫ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК

Расчеты криогенных установок любого класса ( $R, L, D$  или комбинированных) всегда начинаются с составления и анализа энергетических и эксергетических балансов.

Общая методика составления энергетических балансов основана на рассмотрении открытой термодинамической системы-криоблока, включающего СПО, СОО и СИО. Находящаяся выше уровня  $T_{OC}$  СИТ на этой стадии не рассматривается.

Баланс удобно представлять как равенство между величинами прихода и расхода холода; при этом контрольную поверхность ограничивают верхним температурным уровнем  $T_{OC}^+$ .

При составлении баланса удобно полезный эффект, получаемый в криоблоке, вынести в одну часть уравнения, а остальные величины - в другую часть, причем знак слагаемых целесообразно определять из следующих соображений. Поступление энергии в систему рассматривается как потеря холода и входит в уравнение со знаком минус, а отвод энергии - как приход холода и имеет знак плюс. Аналогично составляется и баланс эксергии; все члены уравнения, отражающие приход эксергии, имеют знак плюс, а расход - знак минус. Уравнение (1) представляет энергетический баланс - баланс холода, а уравнение (2) - баланс эксергии для общего случая. Чтобы избежать использования абсолютных значений энтальпии (которые в различных диаграммах имеют разные точки начала отсчета), везде используются разности энтальпий  $\Delta i$ . Эти разности берутся для каждого потока между действительным значением  $i$  и тем, которое соответствует  $T_{OC}$  и  $p_{OC}$ . Аналогично берутся и величины эксергии (с учетом того, что  $e_p$  и  $e_T$  при  $T_{OC}$  и  $p_{OC}$  равны нулю).

В уравнениях (1) и (2) использованы следующие обозначения.

- 
- \*) Исключение составляет большинство криогенных установок, работающих по нестационарным процессам, где СИТ рассматривается совместно с криоблоком.

### Энергетический баланс

$\sum Q_0$  - количество тепла, отводимого от криостатируемых объектов, (полезная холодопроизводительность);

$\sum m_{конд} \Delta i_{конд}$  - количество тепла, необходимого для конденсации вещества (получение жидких или замороженных продуктов);

$\sum Q_{отб}$  - количество тепла, отведенного от криоблока посторонними источниками холода (дополнительное внешнее охлаждение);

$\sum L_{отб}, \sum L_{подв}$  - соответственно работа отведенная (детандер) или подведенная к криоблоку (например, насос охлажденного газа);

$\sum m_{порв} \Delta i_{порв}$  - изотермический дроссель-эффект соответственно подводимого или отводимого потоков;

$\sum m_{отб} \Delta i_n$  - потери от недорекуперации;

$\sum m_j \Delta i_{см}$  - тепловые эффекты, происходящие в криоблоке вследствие смешения или разделения рабочих веществ (неидеальных смесей), а также конверсии (для водорода).

### Эксергетический баланс

$\sum E_{q_0}$  - полезная эксергия, отводимая к охлаждаемым (криостатируемым) объектам (эксергетическая холодопроизводительность);

$\sum m_{конд} \Delta e_{конд}$  - эксергия, затраченная на конденсацию веществ (получение жидких или твердых продуктов);

$\sum m_{подв} \Delta e_{подв}$  - эксергия, поступающая (уходящая) с подведенным (отведенным) потоком;

$\sum L_{подв}, \sum L_{отб}$  - соответственно работа, подведенная и отведенная от системы;

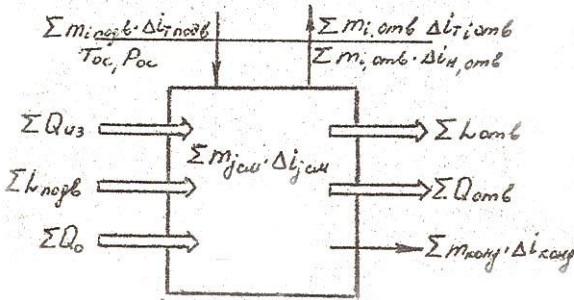
$\sum E_{q_{подв}}$  - подведенная к системе эксергия теплового потока;

$\sum m_j \Delta e_{j,см}$  - при дополнительном внешнем охлаждении эксергия смешения веществ (минимальная работа разделения с обратным знаком);

$\sum D_i$  - потери энергии в системе.

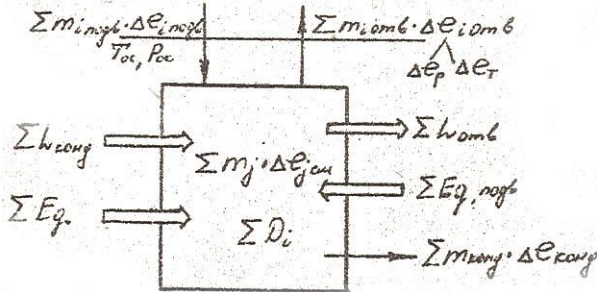
Балансы криоблока

а) Энергетический баланс



$$\sum Q_0 + \sum m_{kong} \cdot \Delta i_{kong} + \sum m_j \cdot \Delta i_{jcu} = \sum Q_{omb} + \sum h_{omb} + \sum m_{i,nogl} \cdot \Delta i_{i,nogl} + \sum m_{i,omb} \cdot \Delta i_{i,omb} + \sum m_{i,omb} \cdot \Delta i_{n,omb} - \sum h_{nogl} \quad (1)$$

б) Эксергетический баланс



$$\sum E_{q,0} + \sum m_{kong} \cdot \Delta e_{kong} + \sum m_j \cdot \Delta e_{jcu} = \sum m_{i,nogl} \Delta e_{i,nogl} + \sum h_{nogl} + \sum E_{q,nogl} + \sum m_{i,omb} \Delta e_{i,omb} + \sum h_{omb} + \sum D_i \quad (2)$$

$$+ \sum E_{q,nogl} - \sum m_{i,omb} \Delta e_{i,omb} - \sum h_{omb} - \sum D_i$$

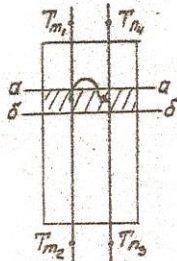
$\Delta e_{i,omb}$   
 $\Delta e_p \quad \Delta e_T$



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР МЕЖДУ ПОТОКАМИ В ТЕПЛООБМЕННИКАХ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК

Потери от необратимости, связанные с конечной разностью температур, составляют значительную долю суммарных потерь в криоблоках систем классов  $R$ ,  $L$  и  $D$ . Величина их зависит не только от разности температур между потоками, участвующими в теплообмене, но и, главным образом, от температурного уровня теплопередачи.

Для определения потерь, связанных с конечной разностью температур, рассмотрим схему противоточного регенеративного теплообменника (рис. I).



Поток  $m$  охлаждается изобарно от  $T_{m1}$  до  $T_{m2}$ , благодаря чему увеличивается его эксергия. Поток  $n$  отдает эксергию потоку  $m$  и нагревается от  $T_{n3}$  до  $T_{n4}$ .

Для того, чтобы шел процесс теплопередачи, необходимо обеспечить положительную разность температур между потоками  $m$  и  $n$ . Это приводит к тому, что прямой поток  $m$  получает меньше эксергии, чем отдает обратный. В результате

$$\text{Рис. I} \quad E_{m2} - E_{m1} < E_{n3} - E_{n4}$$

Величиной  $D = (E_{n3} - E_{n4}) - (E_{m2} - E_{m1})$  и определяется потеря от необратимости, связанная с конечной разностью температур прямого  $m$  и обратного  $n$  потоков в теплообменнике.

Теплообменные аппараты необходимо проектировать так, чтобы потеря  $D$  от необратимости при теплообмене сводилась бы к минимуму при некоторой поверхности  $F$  теплообмена. Таким образом, в задачу входит определение такого закона изменения разности температур  $\Delta T_{m-n}$ , при котором потери для заданной поверхности были бы минимальными.

Потеря эксергии на элементарном участке между сечениями  $a-a$  и  $\delta-\delta$  определяется по уравнению:

$$\delta D_i = \delta Q \Delta T_{e,m-n}$$

где  $\Delta T_{em-n}$  - разность эксергетических температур между сечениями  $a-a$  и  $b-b$ .

Тогда по всей длине теплообменника потеря эксергии составит

$$D = \int_{T_{n3}}^{T_{n4}} dQ \Delta T_E = \int_{T_{n3}}^{T_{n4}} dQ \left( \frac{T_n - T_{oc}}{T_n} - \frac{T_m - T_{oc}}{T_m} \right) = T_{oc} \int_{T_{n3}}^{T_{n4}} \frac{\Delta T_{m-n}}{T_n (T_n + \Delta T_{m-n})} dQ.$$

Так как  $dQ = c_p dT_n m_n$ , то

$$D = T_{oc} \int_{T_{n3}}^{T_{n4}} \frac{c_p m_n \Delta T_{m-n}}{T_n (T_n + \Delta T_{m-n})} dT_n. \quad (3)$$

Таким образом, задача сводится к определению минимума функционала в уравнении (3), т.е. такой функции  $\Delta T_{m-n}(T_n)$ , при которой  $D$  будет иметь минимальное значение в заданных условиях.

Запишем выражение для  $dQ$  в следующем виде:

$$dQ = m_n c_p dT_n = \bar{K} \Delta T_{m-n} dF, \quad (4)$$

откуда

$$dF = \frac{m c_p dT_n}{K \Delta T_{m-n}}, \quad (5)$$

или

$$F = \frac{m c_p}{K} \int_{T_{n3}}^{T_{n4}} \frac{dT_n}{\Delta T_{m-n}}, \quad (6)$$

$$\int_{T_{n3}}^{T_{n4}} \frac{dT_n}{\Delta T_{m-n}} = \frac{KF}{m c_p}. \quad (7)$$

Решение уравнений (3) и (7) с отысканием целевой функции  $\Delta T_{m-n} = \mathcal{U}(T_n)$  при постоянных величинах  $F$ ,  $c_p$ ,  $m_n$  приводит к уравнению вида

$$\Delta T_{m-n} = a T_n, \quad (8)$$

где постоянная

$$a = \frac{m c_p \ln \frac{T_{n4}}{T_{n3}}}{KF}. \quad (9)$$

Следовательно, при проектировании криогенных систем необходимо стремиться к осуществлению закона протекания разности температур в регенеративных теплообменниках, возможно близкому к описанному уравнением (8). Он состоит в том, что разность темпера-

тур  $\Delta T_{m-n}$  должна расти по линейному закону от холодного к теплому концу теплообменника.

Тепловые эквиваленты прямого  $m_m \bar{c}_{p_m}$  и обратного потоков  $m_n \bar{c}_{p_n}$  в системах  $R$  и  $D$  близки один к другому (поскольку  $\sum m_n = \sum m_m$ , а  $\bar{c}_{p_m}$  и  $\bar{c}_{p_n}$  различаются только вследствие отличия свойств рабочего тела от идеального газа). В системах  $L$  и  $D_L$  обратный поток меньше прямого  $\sum m_n < \sum m_m$ . Поэтому в первом случае (системы  $R$  и  $D$ ) величина  $\Delta T_{m-n}$  сохраняет примерно постоянное значение по длине теплообменника или возрастает к холодному концу. Во втором случае (системы  $L$  и  $D_L$ ) разность температур  $\Delta T_{m-n}$  в еще большей степени растет к холодному концу. Поэтому, чтобы обеспечить уменьшение  $\Delta T_{m-n}$  к холодному концу теплообменника, необходимо с помощью внешнего или внутреннего охлаждения прямого потока  $m_m$  (или его части) дополнительное понижение его температуры. В реальных условиях подобно достаточно точно линейный закон изменения разности  $\Delta T_{m-n}$  температур от  $T_n$  невозможно, так как это потребовало бы включения бесконечно большого числа источников охлаждения. Поэтому на практике обычно реализуется ступенчатое изменение  $\Delta T_{m-n}$ , когда каждая ступень охлаждения приводит к уменьшению  $\Delta T_{m-n}$  к холодному концу соответствующего участка. Это охлаждение ведется так, чтобы величина  $\Delta T_{m-n}$  не выходила за заранее установленное проектировщиком поле допуска (рис.2). Использование такого поля служит основой теплового расчета систем  $R$  и  $L$ , описанной в [1].

Обычно поле допуска задается двумя лучами. Коэффициенты в уравнениях определяются на основе оптимизационных расчетов, проведенных для выбранных хладагентов и заданного класса установки с учетом температурного уровня ступени использования охлаждения (СИО).

Три варианта полей  $\Delta T_{m-n} = \alpha T_n$  приведены для расчета гелиевых установок класса  $R_S$  и  $L$  с температурным уровнем в СИО 4,2К (рис.2). На этом же рисунке показана схема протекания потоков в теплообменных аппаратах установки.



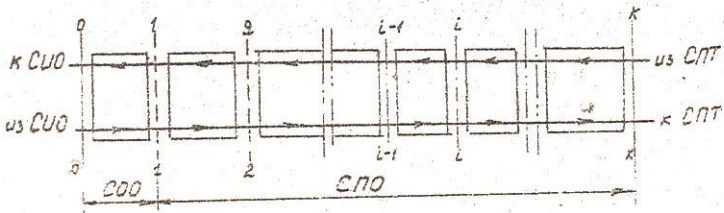
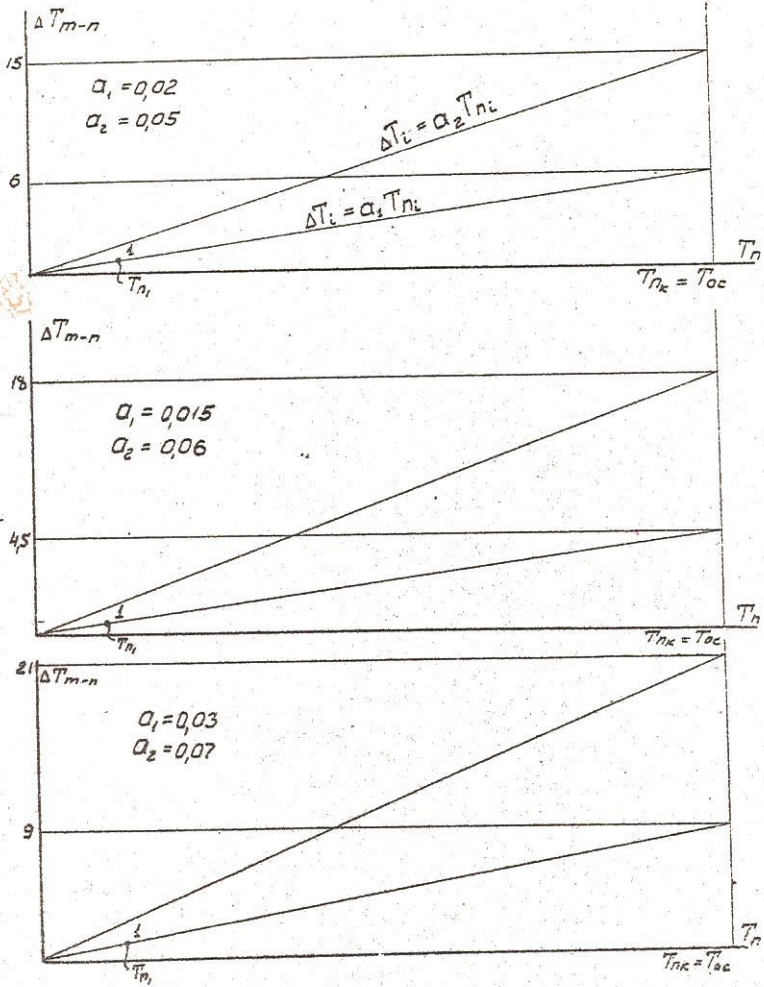


Рис. 2

Для построения графиков протекания температур можно принять условия, представленные в табл.1+3.

Варианты схем СПО

Табл.1

№ вариант.схем	1	2	3
Схемы блоков элементов			

Табл.2

Варианты соотношения потоков на границе СОО и СПО

№ вариантов	1	2	3	4
$\gamma = \frac{G_n}{G_m}$	1	0,95	0,90	0,80

Табл.3

Исходные данные для расчета

$P_m$ , МПа	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5
$T_{n_1}$ , К	8,0	9,0	10,0	12,0	17,7	21,0
$\bar{c}_{pm}$ , $\frac{Дж}{г.град}$	5,60	5,54	5,50	5,44	5,35	5,29

Отношение теплоемкостей  $d = \frac{\bar{c}_{pm}}{\bar{c}_{pn}}$  прямого ( $m$ ) и обратного ( $n$ ) потоков принять равными:

для  $0,8 \leq P_m \leq 1,2$   $d = 1,06$ ;

для  $1,5 \leq P_m \leq 2,5$   $d = 1,03$ .

Расчетные связи для участков СПО (расчет начинается с сечения  $i = 2$ , см.рис.2).

а) Для охлаждаемых участков.

1. Параллельно включенный детандер (рис.3).

Задано:  $P_m, P_n, T_{n_{i-1}}, K=1,66, \bar{c}_{ag}=0,8$ .

Найти:  $T_{n_i}$

Исходные зависимости:

уравнение изоэнтропного расширения

$$T_{m_i} = \frac{T_{n_{i-1}}}{1 - \lambda_{ag} \left[ 1 - \left( \frac{p_m}{p_n} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}; \quad (I)$$

закон изменения разности температур

$$\Delta T_i = a_2 T_{n_i}; \quad (2)$$

условие соблюдения I-го начала

$$\Delta T_i = T_{m_i} - T_{n_i}. \quad (3)$$

Решение: Подставить исходные данные и зависимости (2) и (3) в уравнение (I), найти значение

$$T_{n_i} = \frac{T_{n_{i-1}}}{\left\{ 1 - \lambda_{ag} \left[ 1 - \left( \frac{p_m}{p_n} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \right\} (1 + a_2)}$$

2. Охлаждение от внешнего источника (рис.4).

Задано:  $T_{n_{i-1}}$ ,  $\bar{c}_{p_m}$ ,  $p_m$ .

Найти:  $Q$  - количество тепла, которое необходимо отвести от потока  $p_m$ .

Исходные зависимости:

$$\text{уравнение теплового баланса } Q = G_m \Delta t_m, \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta t_m = \bar{c}_{p_m} (T_{m_i} - T_{m_{i-1}});$$

закон изменения разности температур

$$\Delta T_i = a_2 T_{n_i}; \quad (2)$$

условие соблюдения II-го начала

$$T_{m_i} - T_{m_{i-1}} + \Delta T_{i-1} = \Delta T_i + T_{n_i} - T_{n_{i-1}}$$

т.к.  $T_{n_i} = T_{n_{i-1}}$ , то  $T_{m_i} - T_{m_{i-1}} + \Delta T_{i-1} = \Delta T_i. \quad (3)$

Решение: Подставить исходные данные и зависимости (2) и (3) в уравнение теплового баланса (I):  $Q = G_m \bar{c}_{p_m} (\Delta T_i - \Delta T_{i-1})$ .

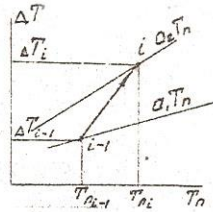


Рис.3

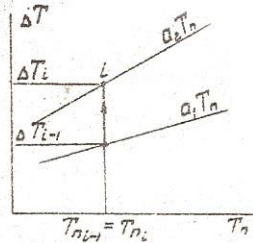


Рис.4

3. Последовательно включенный детандер (рис.4.)

Задано:  $T_{n_{i-1}}$ ,  $\rho_{m_{i-1}}$ ,  $K=466$ ,  $\lambda_{ог}$ ,  $\Delta T_{i-1}$ .

Найти:  $\rho_{m_i}$  - давление на входе в детандер.

Исходные зависимости:

уравнение изэнтропного расширения

$$T_{m_i} = \frac{T_{m_{i-1}}}{1 - \lambda_{ог} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{m_i}}{\rho_{m_{i-1}}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (I)$$

Законы изменения разности температур

$$\Delta T_i = a_2 T_{n_i}; \quad (2)$$

$$\Delta T_{i-1} = a_1 T_{n_{i-1}}; \quad (2')$$

условия соблюдения II-го начала

$$\Delta T_i = T_{m_i} - T_{n_i} = T_{m_{i-1}} - T_{n_{i-1}}; \quad (3)$$

т.к.  $T_{n_i} = T_{n_{i-1}}$ ,  $\Delta T_{i-1} = T_{m_{i-1}} - T_{n_{i-1}}$ . (3')

Решение: Поставить исходные данные и зависимости (2), (2'), (3) и (3') в уравнение (I) и решить его относительно  $\rho_{m_i}$

$$\rho_{m_i} = \rho_{m_{i-1}} \sqrt[\frac{\kappa-1}{\kappa}]{1 - \frac{a_2 - a_1}{(1 + a_2)\lambda_{ог}}}$$

б) Для несхлаждаемых участков - регенеративный теплообменник (рис.5).

Задано:  $T_{n_{i-1}}$ ,  $\Delta T_{i-1}$ ,  $\gamma$ ,  $c$ .

Найти:  $T_{n_i}$

Исходные зависимости:

уравнение теплового баланса:

$$G_m \Delta i_m = G_n \Delta i_n, \quad (I)$$

где:  $\Delta i_m = \bar{c}_{pm} (T_{m_i} - T_{m_{i-1}})$ ,

$\Delta i_n = \bar{c}_{pn} (T_{n_i} - T_{n_{i-1}})$ .

Закон изменения разности температур

$$\Delta T_i = a_2 T_{n_i}; \quad (2)$$

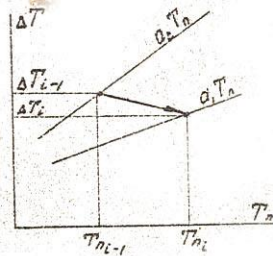


Рис.5.



условие соблюдения II-го начала:

$$T_{m_i} - T_{m_{i-1}} + \Delta T_{i-1} = T_{n_i} - T_{n_{i-1}} + \Delta T_i. \quad (3)$$

Решение: Поставить исходные данные и зависимости (2) и (3) в уравнение теплового баланса (I), и решить его относительно  $T_{n_i}$ :

$$T_{n_i} = \frac{\Delta T_{i-1} - \Psi (T_{n_{i-1}})}{\alpha_i - \Psi},$$

где

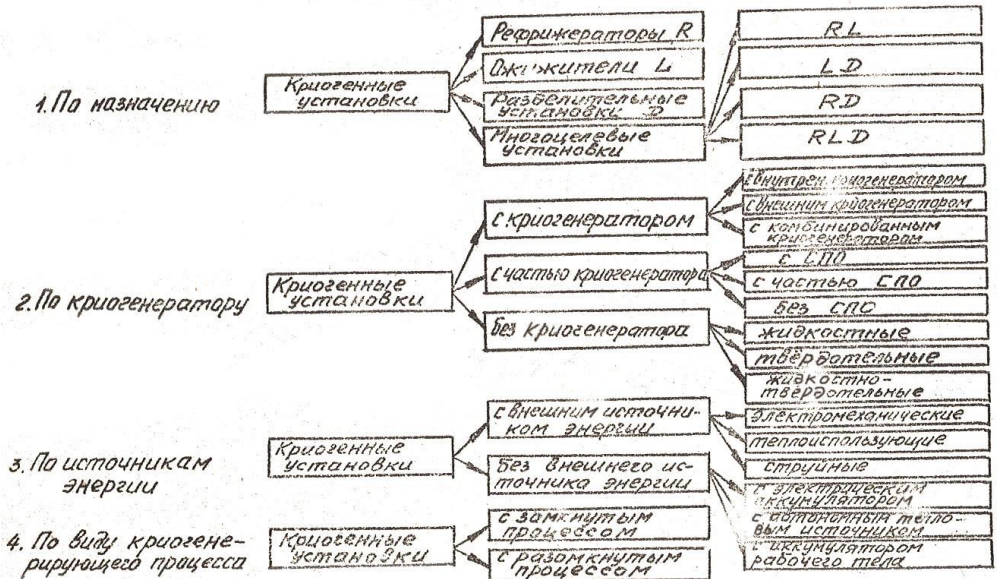
$$\Psi = \frac{\gamma}{\epsilon} - 1.$$

- Примечания: 1. Выбор варианта схемы, исходных параметров и характеристика зависимости  $\Delta T = f(T_n)$  проводится по указанию преподавателя.
2. При расчете параметров на входе в детандер газ принимается идеальным.

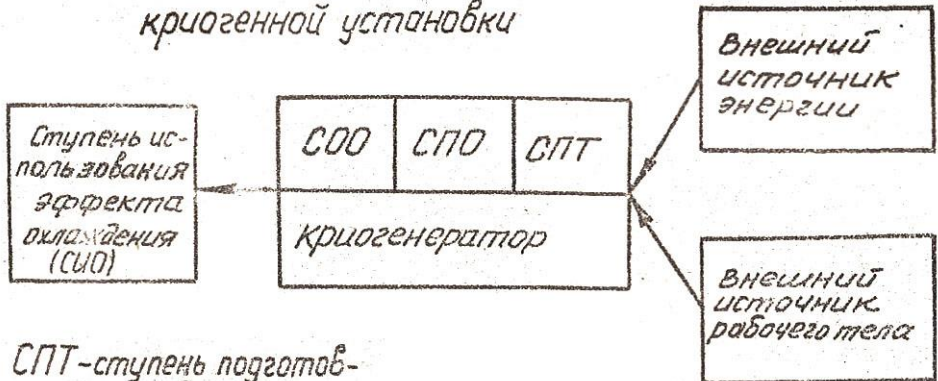
#### ЛИТЕРАТУРА

1. БРОДЯНСКИЙ В.М., ТАВБИНА А.Г. Методика расчета схем криогенных установок. МЭИ, 1972, 86 с.

## Классификация криогенных установок



### Блок-схема криогенной установки



- СПТ - степень подготовки рабочего тела.
- СПО - степень предварительного охлаждения.
- СОО - степень окончательного охлаждения.

Кафедра криогенной техники

Авторы В.М.Бродянский, А.Б.Грачев, Ю.В.Синявский, А.Т.Ташина

Редактор В.М.Бродянский

Формат бумаги 84x108/32      Усл.п.л. 0,8      Бесплатно  
23/XI - 1978 г.      Тираж 500      Заказ 3059

---

Типография МЭИ, Красноказахменная, 13