

4991/2-76

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



A-239

13/xII-76

P8 - 10039

А.И.Агеев, В.А.Белушкин, А.Г.Зельдович,  
В.В.Крылов

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ  
И КРИОСТАТИРОВАНИЯ КРУПНЫХ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ

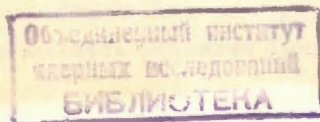
**1976**

P8 - 10039

А.И.Агеев, В.А.Белушкин, А.Г.Зельдович,  
В.В.Крылов

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ  
И КРИОСТАТИРОВАНИЯ КРУПНЫХ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ

Направлено в журнал "Химическое и нефтяное  
машиностроение"



В связи с переходом от изучения сверхпроводимости как физического явления к созданию крупных сверхпроводящих устройств (СПУ) проблемы охлаждения и криостатирования этих устройств в настоящее время приобретают немаловажное значение. Уже сейчас известны СПУ, масса которых составляет несколько тонн. Теплопритоки в таких устройствах, измеряемые десятками и сотнями ватт<sup>/1/</sup>, необходимо компенсировать на уровне 4,5К. Охлаждение и криостатирование крупных СПУ целесообразно производить с помощью специально предназначенных для подобных целей гелиевых рефрижераторов. При этом оказывается, что в этих случаях рефрижератор работает не в обычном, расчетном (ожигительном или рефрижераторном) режиме, а в некотором промежуточном, комбинированном, нерасчетном<sup>/2,3,6/</sup>. Так, в процессе предварительного охлаждения СПУ скорость снижения температуры определяется не только характеристиками машин и аппаратов рефрижератора, но и характеристиками охлаждаемого объекта и коммуникаций, связывающих объект с рефрижератором. В процессе криостатирования СПУ рефрижератор дополнительно должен еще и обеспечить нужную скорость накопления жидкого гелия в криостатах, причем эта задача нередко осложняется необходимостью одновременного отвода из СПУ части холодного гелия мимо рефрижератора, например для охлаждения тоководов.

Таким образом, полезно проанализировать работу системы рефрижератор - СПУ в комплексе. При этом целесообразно выделить и рассмотреть по отдельности следующие этапы: охлаждение объекта от комнатной

температуры до температуры конденсации гелия; накопление жидкого гелия в криостатах СПУ; поддержание объекта при заданной температуре – криостатирование.

## 1. ОХЛАЖДЕНИЕ

В этот период необходимо вести процесс так, чтобы временные и пространственные градиенты температуры не превышали допустимых для данного СПУ значений. Кроме того, процесс охлаждения желательно провести экономично, без излишних затрат как энергии, так и посторонних хладагентов.

Для выбора оптимального способа ведения процесса охлаждения рассмотрим работу дроссельной ступени рефрижератора в период, когда температура гелия выше инверсионной. Дроссельная ступень (рис. 1) состоит из теплообменника I и дроссельного вентиля II; в качестве теплообменника III условно изображен участок, на котором к газу подводится тепло от охлаждаемого объекта IV.

Примем также следующие допущения:

- газ идеальный ( $c_p = \text{Const}$ );
- теплопроводность объекта бесконечно велика;
- теплоемкость дроссельного теплообменника пренебрежимо мала по сравнению с теплоемкостью объекта;
- изменением массы газа за счет накопления его в криостате объекта можно пренебречь;
- теплоприток из окружающей среды не учитывается.

Из уравнений энергетического баланса и теплообмена можно получить следующие выражения:

$$Q = Gc_p(T_4 - T_1), \quad (1)$$

$$Q = aF\Delta T, \quad (2)$$

$$Gc_p(T_2 - T_1) = Gc_p(T_3 - T_4) = k_T F_T \Delta t. \quad (3)$$

Здесь  $Q$  – количество тепла, отводимого от объекта в единицу времени;  $G$  – расход хладагента,  $c_p$  – его теплоемкость;  $a$  – коэффициент теплоотдачи от объекта к газу;  $F$  – площадь поверхности охлаждения объекта;

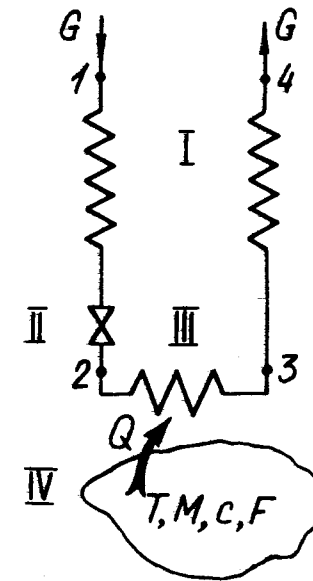


Рис. 1. Дроссельная ступень рефрижератора с охлаждаемым объектом. I – теплообменник, II – дроссель, III – теплообменник-нагрузка, IV – охлаждаемый объект.

$\overline{\Delta T}$  – средняя разность температур объекта и хладагента;  $\Delta t$  – разность температур потоков в теплообменнике I;  $\Delta t = T_4 - T_1 = T_3 - T_2$ ;

$k_T, F_T$  – коэффициент теплопередачи и площадь поверхности дроссельного теплообменника.

Приняв в качестве  $\overline{\Delta T}$  логарифмическую разность температур

$$\overline{\Delta T} = \frac{T_3 - T_2}{\ln \frac{T - T_2}{T - T_3}},$$

где  $T$  – температура объекта, и решив систему уравнений 1-3, найдем

$$Q = Gc_p (T - T_1) \frac{1 - e^{-\gamma}}{1 + \frac{k_T F_T}{Gc_p} (1 - e^{-\gamma})} \quad (4)$$

Здесь

$$\gamma = \frac{aF}{Gc_p} \quad (5)$$

Скорость охлаждения объекта найдем из равенства

$$Qd\tau = McdT \quad (6)$$

Здесь  $\tau$  - время,  $Mc$  - теплоемкость объекта.

С учетом (4) получим

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{Q}{Mc} = \frac{Gc_p}{Mc} (T - T_1) \frac{1 - e^{-\gamma}}{1 + \frac{k_T F_T}{Gc_p} (1 - e^{-\gamma})} \quad (7)$$

Анализ этого выражения показывает, что наличие теплообмена в дроссельной ступени существенно снижает темп охлаждения (величина  $k_T \cdot F_T$  в знаменателе). Поэтому в начальный период охлаждения необходимо этот теплообмен исключить. С этой целью можно, например, в течение всего процесса охлаждения газ из объекта сбрасывать в поток низкого давления, минуя рефрижератор. Однако такой способ крайне неэкономичен и не может быть рекомендован для крупных объектов. Лучше иметь в рефрижераторе одну или несколько обводных линий, позволяющих на нужный период времени исключить вредный теплообмен. При работе с обводами ( $k_T F_T = 0$ ) скорость охлаждения будет определяться следующим выражением:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{Gc_p}{Mc} (T - T_1) (1 - e^{-\gamma}) \quad (8)$$

Проанализируем величины, входящие в эту формулу.

Расход хладагента  $G$  в большинстве случаев лимитируется величиной предельно допустимого давления в охлаждаемом устройстве, которое, в свою очередь, является функцией гидравлического сопротивления трубопровода для обратного потока, соединяющего объект с рефрижератором.

Из простых гидродинамических соотношений легко показать, что  $\Delta p \sim \lambda \frac{G^2}{\rho}$ , где  $\Delta p$  - перепад давлений в линии обратного потока,  $\lambda$  - коэффициент трения,  $\rho$  - плотность.

Учитывая зависимости коэффициента трения от числа Рейнольдса  $\lambda \sim Re^{-0,25}$  и вязкости гелия от температуры  $\eta \sim T^{0,647/7}$ , можно получить зависимость допустимого расхода хладагента от его температуры:

$$G \leq G_e \left( \frac{\Delta p}{\Delta p_e} \right)^{0,571} \left( \frac{T_e}{T} \right)^{0,664} \quad (9)$$

где  $G$  - расход хладагента в пусковом, а  $G_e$  - в рабочем режимах;  $\Delta p$  - предельно допустимый,  $\Delta p_e$  - рабочий перепады давлений;  $T, T_e$  - температура хладагента в линии обратного потока в пусковой и рабочий периоды.

Из (9) следует, например, что если  $\Delta p = \Delta p_e$ , то при температуре 100 К расход хладагента будет приблизительно в 8 раз меньше, чем при рабочей ( $T = 4,2$  К) температуре.

Разность температур объекта и хладагента ( $T - T_1$ ), как уже упоминалось, ограничивается величиной допустимых градиентов температуры в охлаждаемом объекте. Последние, в свою очередь, определяются конкретными конструктивными особенностями объекта.

Наконец, условия теплоотдачи характеризуются величиной  $\gamma = \frac{aF}{Gc_p}$ . Оценка этой величины для выполненных конструкций СПУ показывает, что в большинстве случаев  $\gamma > 1$ . Поэтому в уравнении (8) величиной  $e^{-\gamma}$  можно пренебречь, и реальная скорость охлаждения будет мало отличаться от предельно возможной, равной

$$\left( \frac{dT}{d\tau} \right)_{\max} = \frac{Gc_p}{Mc} (T - T_1) \quad (8a)$$

## II. НАКОПЛЕНИЕ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

Этот процесс мы рассмотрим на примере работы рефрижератора в комплексе со сверхпроводящим устройством, имеющим охлаждаемые газообразным гелием токовводы. В рассматриваемый период рефрижератор компенсирует теплопритоки из окружающей среды и производит жидкий и холодный газообразный гелий. При этом желательно, чтобы была обеспечена максимальная скорость накопления жидкого гелия. Для определения оптимальных параметров режима работы системы рассмотрим понятия "характеристика токоввода" и "характеристика рефрижератора".

Характеристики токоввода  $Q_T = f(G_T)_I$  определяют зависимость между потоком идущего через токоввод охлаждающего газа  $G_T$  и теплопритоком по токовводу  $Q_T$  при разных значениях рабочего тока  $I$ . Эти характеристики существенно зависят от конструкции токоввода и могут быть рассчитаны или определены экспериментальным путем. Обычно они имеют вид, показанный на рис. 2 /3,5/.

Характеристика рефрижератора показывает, как изменяется величина допустимой тепловой нагрузки  $Q_R$  в зависимости от количества сливаемого гелия  $G_L$ . В первом приближении и с учетом имеющихся немногочисленных экспериментальных данных /2-4/ эту зависимость можно считать линейной и записать в виде:

$$Q_R = \beta(G_L^* - G_L), \quad (10)$$

где

$$\beta = \frac{Q_R^*}{G_L^*} \quad (11)$$

- характеристический коэффициент рефрижератора,  $Q^*$  - холодопроизводительность рефрижератора в рефрижераторном режиме,  $G_L^*$  - производительность его в ожигательном режиме.

На рис. 3 эта зависимость представлена прямой 1.

Для построения характеристики системы необходимо решить совместно уравнение  $Q_T = f(G_T)$  при нулевом

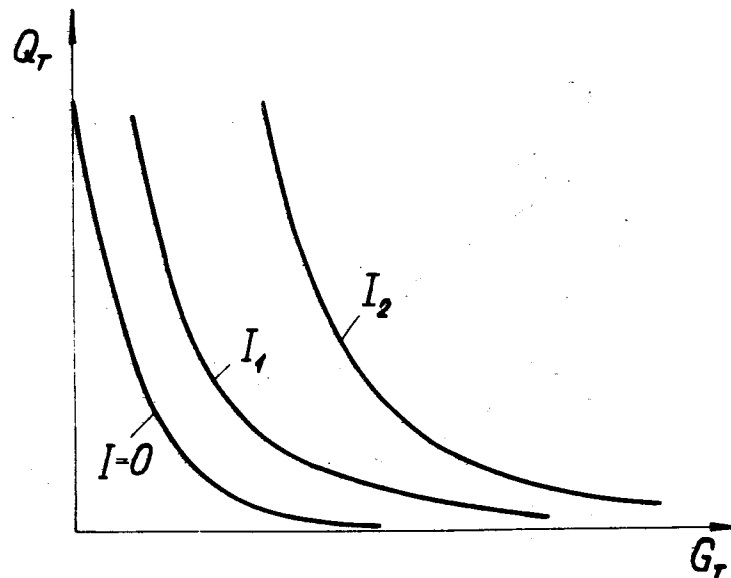


Рис. 2. Типичные характеристики токовводов.  $G_T$  - расход охлаждающего газа,  $Q_T$  - теплоприток по токовводу,  $I$  - величина электрического тока;  $I_2 > I_1 > I_0$ .

токе и уравнение  $Q_R = \beta(G_L^* - G_L)$  с учетом теплопритока из окружающей среды  $Q_0$ , который в рассматриваемый период можно считать постоянным.

В результате решения найдем зависимость скорости ожигения от количества подаваемого на охлаждение токовводов газа  $G_L = f(G_T)_{I=0}$ . На рис. 3 показано построение вспомогательной кривой 4, с помощью которой определяются искомые величины. При построении необходимо учесть, что энтальпия охлаждающего токоввода газа отличается от энтальпии жидкого гелия на величину теплоты испарения  $r$ , поэтому отвод на токовводы газа в количестве  $G_T$  приведет к уменьшению темпа накопления жидкого гелия на величину  $G_T(1 - \frac{r}{\beta})$ , меньшую чем  $G_T^*$ .

\*) При отводе пара, а не жидкости возникает "избыточная" холодопроизводительность  $\Delta Q = G_T r$ . При этом из (10) следует, что  $|\Delta Q| = \beta |\Delta G|$ , откуда  $\Delta G = G_T \frac{r}{\beta}$ .

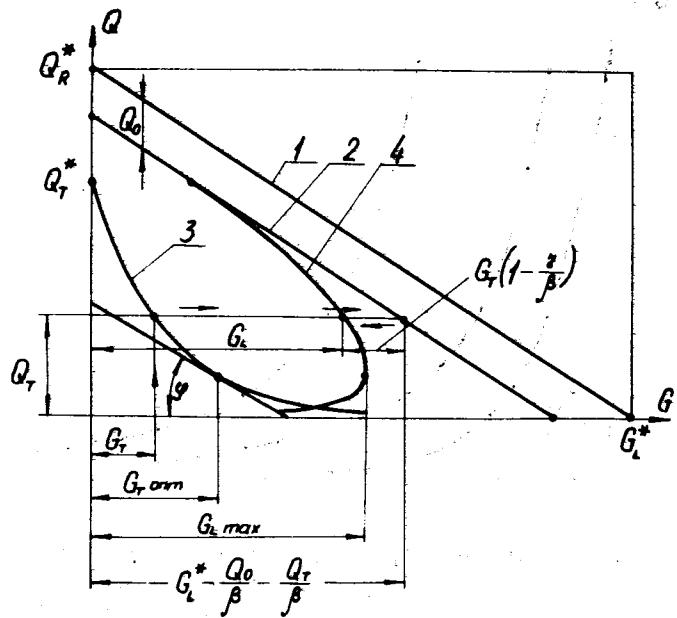


Рис. 3. К построению характеристики системы рефрижератор - СПУ с охлаждаемыми токовводами в период накопления жидкого гелия. 1.  $Q_R = \beta(G_L^* - G_L)$ , 2.  $Q_R = \beta(G_L^* - G_L) - Q_0$ , 3.  $Q_T = f(G_T)_{I=0}$ , 4.  $Q_R = \beta(G_L^* - G_L) - Q_0 - \beta G_T(1 - \frac{r}{\beta})$ .

Характеристика системы в рассматриваемый период выражается уравнением

$$G_L = G_L^* - \frac{Q_0}{\beta} - \frac{Q_T}{\beta} - G(1 - \frac{r}{\beta}) \quad (12)$$

и имеет вид, показанный на рис. 4.

Для определения оптимального потока отводимого на токовводы газа, при котором достигается максимальная скорость оживания, продифференцируем уравнение (12) по  $G_T$

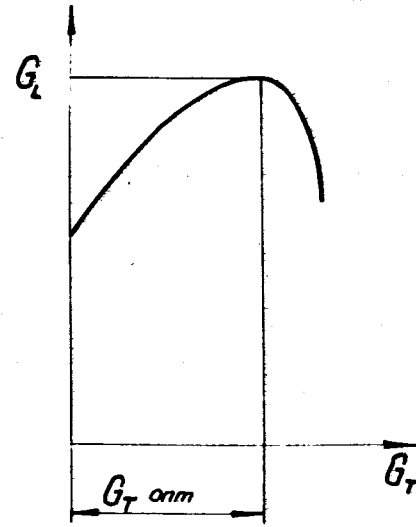


Рис. 4. Характеристика системы рефрижератор - СПУ с охлаждаемыми токовводами в период накопления жидкого гелия.

$$\frac{dG_L}{dG_T} = -\frac{1}{\beta} \frac{dQ_T}{dG_T} - 1 + \frac{r}{\beta} \quad (13)$$

и, приравняв правую часть нулю, найдем

$$\left(\frac{dQ_T}{dG_T}\right)_{\text{опт}} = r - \beta. \quad (14)$$

Таким образом, имея лишь зависимость  $Q_T = f(G_T)_{I=0}$  и зная характеристический коэффициент рефрижератора  $\beta$ , можно определить оптимальный поток через токовводы. Для этого нужно провести касательную к кривой  $Q_T = f(G_T)_{I=0}$  под углом  $\phi = \arctg(\beta - r)$  (рис. 3).

Из уравнения (12) следует, что если разность между  $G_L^*$  и остальными членами уравнения невелика, то даже при оптимальном потоке через токовводы скорость накопления жидкого гелия может оказаться неприемлемо низкой ( $G_L^{\text{max}} \ll G_L^*$ ). В этом случае целесообразно предварительно накопить жидкий гелий в хорошо теплоизо-

лированных сосудах, затем охладить систему до температуры, близкой к рабочей, и перелить жидкий гелий из сосудов в криостатируемый объект.

### III. КРИОСТАТИРОВАНИЕ

Характеристика системы в этом режиме представляет собой зависимость холодопроизводительности рефрижератора от потока холодного газа, подаваемого в токоввод  $Q_R = f(G_T)$ . Поэтому и характеристику рефрижератора удобнее представить в виде  $Q_R = Q_R^* - \beta_1 G_T$  (рис. 5), где  $\beta_1 = \frac{Q_R^*}{G_T^*}$ . Связь между  $\beta$  и  $\beta_1$  легко найти из соотношения  $G_T^* - G_L^* = G_L^* \frac{\beta}{\beta_1}$  (см. рис. 5).

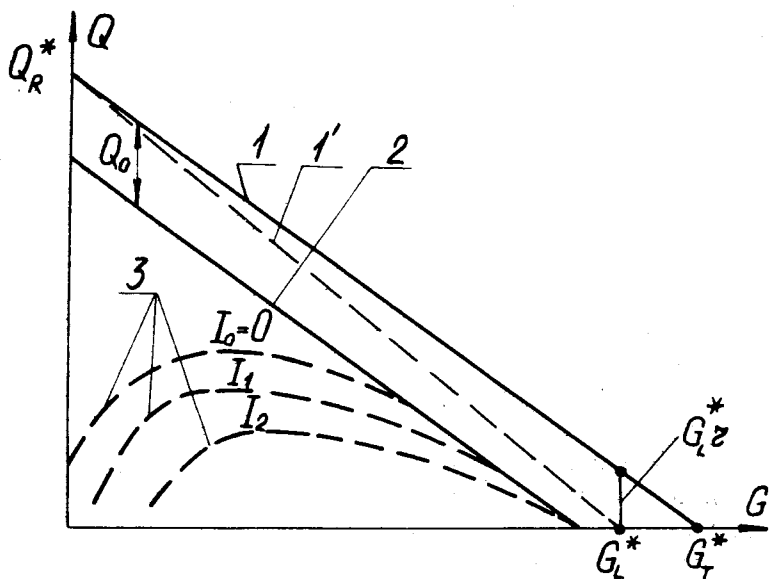


Рис. 5. Характеристика системы в режиме криостатирования. 1.  $Q_R = Q_R^* - \beta_1 G_T$ ; 1'.  $Q_R = Q_R^* - \beta G_L$ ; 2.  $Q_R = Q_R^* - \beta_1 G_T - Q_0$ ; 3.  $Q_R = Q_R^* - \beta_1 G_T - Q_0 - Q_T$ .

Поделив обе части равенства на  $Q_R^*$ , получим

$$\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta} = \frac{\beta}{\beta_1}, \quad (16)$$

откуда  $\beta - \beta_1 = \beta$ .

Решив совместно уравнения  $Q_R = Q_R^* - \beta_1 G_T - Q_0$  (прямая 2 на рис. 5) и  $Q_T = f(G_T)_{I=const}$ , получим семейство характеристик системы, показанное на рис. 5 (кривые 3). Каждая из этих кривых описывается уравнением

$$Q_R = Q_R^* - Q_0 - Q_T - \beta_1 G_T \quad (17)$$

и имеет максимум, соответствующий оптимальному потоку охлаждающего токоввода газа, причем

$$\left(\frac{dQ_T}{dG_T}\right)_{\text{опт}} = -\beta_1. \quad (18)$$

Из уравнений (14), (16) и (18) следует, что при одинаковом токе в токовводах оптимальные потоки в режимах накопления жидкого гелия и криостатирования равны между собой.

Рассмотрим описанные выше процессы на примере системы рефрижератор МГО<sup>/2/</sup> - сверхпроводящий соленоид СПС-600 установки "Кольцетрон"<sup>/1/</sup> (рис. 6).

Многоцелевой гелиевый ожижитель-рефрижератор МГО работает по циклу с предварительным охлаждением сжатого гелия жидким азотом, расширением части потока в поршневом детандере и дросселированием. В рефрижераторе имеются обводные линии на потоке высокого давления, позволяющие исключить теплообмен, являющийся вредным в период предварительного охлаждения. Поршневой детандер снабжен устройствами, позволяющими плавно и в широких пределах изменять его производительность, что обеспечивает возможность установления оптимального распределения потоков между дросселем и детандером. Характеристика рефрижератора близка к прямой линии:  $Q_R^* = 240$  Вт,  $G_L^* = 2,08$  г/с (60 л/ч). Характеристические коэффициенты  $\beta = 240/2,08 = 115$  Дж/г,  $\beta_1 = \beta - \beta = 115 - 20 = 95$  Дж/г.



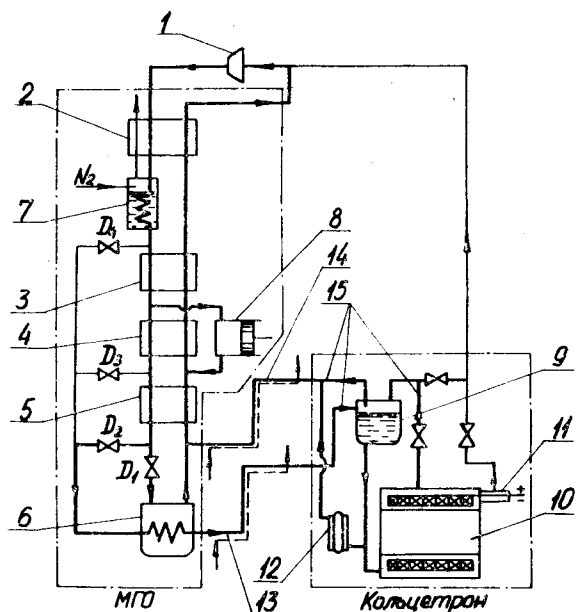


Рис. 6. Принципиальная схема системы рефрижератор МГО - соленоид СПС-600. 1 - компрессор; 2-5 - теплообменники; 6 - сборник жидкого гелия; 7 - ванна жидкого азота; 8 - детандер; 9 - промежуточный сосуд соленоида; 10 - соленоид СПС-600; 11 - токовводы; 12 - резонатор; 13,14 - криогенные магистрали без азотного экрана.

Соленоид СПС-600 предназначен для создания магнитного поля напряженностью 2 Тл. Масса, которую необходимо поддерживать при 4,5 К, составляет ~1500 кг.

Теплопритоки из окружающей среды к узлам кольцетрона приведены в таблице.

Через токовводы СПС-600 пропускается 0,15 г/с холодного газа в режимах охлаждения и накопления жидкого гелия и 0,65±0,8 г/с в режиме криостатирования при токе 2,5±2,75 кА. Теплоприток по токовводам составляет ~1 Вт в режиме накопления и ~5 Вт

### Теплопритоки к узлам кольцетрона

Наименование узла	№ по рис. 6	Теплопритоки Вт
Криостат соленоида СПС-600	10	26
Криогенные магистрали с азотным экранированием (включая стыковочные участки)	13,14	30
Криогенные магистрали без азотного экранирования (включая стыковочные участки)	15	60
Промежуточный сосуд	9	4
Суммарный теплоприток (без токовводов)		120

в режиме криостатирования. К сожалению, полные характеристики токовводов не были сняты.

На рис. 7 приведен график охлаждения кольцетрона. Весь процесс занимает около 26 часов и делится на IV периода. В начальный период (1) начинают подавать жидкий азот в ванну рефрижератора, а гелий, прошедший кольцетрон, сбрасывают в систему сбора грязного гелия, с тем чтобы не разносить высококипящие примеси (влагу, пары растворителей и т.п.) по системам рефрижератора. После охлаждения кольцетрона примерно до -20°C прекращают сброс газа в линию грязного гелия и направляют обратный поток в рефрижератор. В этот второй период охлаждение ведется гелием, имеющим приблизительно постоянную, близкую к точке кипения азота, температуру. Вентиль Д4 (рис. 6) открыт. Когда темп охлаждения начинает снижаться, Д4 закрывают, открывают Д3 и ведут охлаждение с помощью

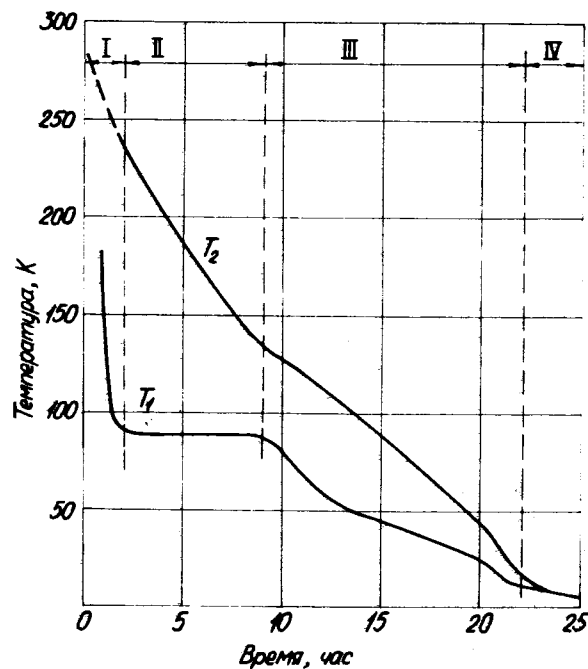


Рис. 7. График охлаждения системы рефрижератор МГО - кольцетрон. T<sub>1</sub> - температура газа на входе в соленоид СПС-600, T<sub>2</sub> - на выходе.

детандера - III период. После того как температура гелия, возвращаемого из кольцетрона, станет ниже инверсионной, включают в работу дроссельную ступень: закрывают Д3, открывают Д2. В конце этого IV периода начинается накопление жидкого гелия.

В режиме накопления скорость ожижения согласно уравнению (12) должна составлять

$$Q_L = Q_L^* - \frac{Q_0}{\beta} - \frac{Q_1}{\beta} - C_T \left(1 - \frac{r}{\beta}\right) =$$

$$= 2,08 - \frac{120}{115} - \frac{1}{115} - 0,15 \left(1 - \frac{20}{115}\right) = 0,907 \text{ л/ч.}$$

Экспериментальные измерения дали  $G_L = 22-23$  л/ч. При таком темпе ожижения процесс накопления жидкого гелия занял бы более 18 час, т.к. емкость кольцетрона около 400 л. Для ускорения заливки после окончания процесса охлаждения в систему передавалось 300-350 л жидкого гелия, заранее запасенного в переносных сосудах Дьюара.

В режиме криостатирования избыточную холодопроизводительность найдем по уравнению (17):

$$Q_R = Q_R^* - Q_0 - Q_T - \beta G_T = 240 - 120 - 5 - 95 \cdot 0,8 = 40 \text{ Вт.}$$

Экспериментально измеренное значение  $Q_R \approx 20$  Вт.

Расхождения между расчетными и экспериментальными значениями  $G_L$  и  $Q_R$  можно объяснить тем, что теплопритоки, указанные в таблице, измерялись при стабильном давлении гелия в обратном потоке, а в процессах наполнения и криостатирования имели место значительные пульсации газа из-за работы поршневых компрессора и детандера. Вследствие этого теплопритоки в стыковых участках трубопроводов и тупиках оказались больше измеренных.

## ВЫВОДЫ

1. Рефрижераторы, предназначенные для криостатирования крупных сверхпроводящих устройств, в большинстве случаев работают в комбинированных рефрижераторно-ожижительных режимах.

2. В схеме рефрижератора необходимо предусматривать специальные обводные линии, позволяющие вести процесс охлаждения с максимальной скоростью.

3. Темп охлаждения, как правило, лимитируется либо допустимым градиентом температуры в объекте, либо сопротивлением линии, по которой газ из объекта возвращается в рефрижератор. Условия теплоотдачи имеют второстепенное значение.

4. При криостатировании сверхпроводящих устройств с охлаждаемыми тоководами существует оптимальный поток охлаждающего тоководы газа, при котором до-

стигаются максимальная скорость накопления жидкого гелия или холодопроизводительность. Для определения этого потока необходимо знать не только характеристику тоководов - зависимость теплопритока от расхода охлаждающего газа, но и характеристику рефрижератора - зависимость холодопроизводительности от количества сливаемого жидкого гелия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Г.Анищенко и др. ОИЯИ, Р9-5488, Дубна, 1970.
2. Н.Н.Агапов и др. ОИЯИ, Р8-8850, Дубна, 1975.
3. G.Horlist et al. The Fourth Intern. Conf. of Magnet Techn. Brookhaven, 1972.
4. R.Clatthaar, F.Kliem. Kaltetechnik-Klimatisiereng, 23, No 9, 268-270 (1971).
5. А.Г.Шиффельбойм, С.П.Горбачев. Труды НПО "Криогенмаш", вып. 17, 159-170 (1975).
6. Н.Н.Агапов и др. ОИЯИ, 8-9436, Дубна, 1976.
7. М.П.Малков и др. Справочник по физико-техническим основам криогеники, " Энергия", 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 августа 1976 года.