

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



С 393з + С 393ок

26/IX-77

A - 233

P9 - 10760

3901/2-77

Н.Н.Агапов, А.И.Агеев, В.А.Белушкин, А.Г.Зельдович

О ВОЗМОЖНОСТИ КРИОСТАТИРОВАНИЯ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ  
СИСТЕМ УСКОРИТЕЛЕЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУЙНЫХ НАСОСОВ  
ДЛЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

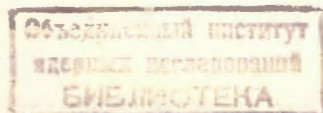
**1977**

P9 - 10760

Н.Н.Агапов, А.И.Агеев, В.А.Белушкин, А.Г.Зельдович

О ВОЗМОЖНОСТИ КРИОСТАТИРОВАНИЯ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ  
СИСТЕМ УСКОРИТЕЛЕЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУЙНЫХ НАСОСОВ  
ДЛЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

*Направлено на X Международную конференцию  
по ускорителям заряженных частиц /Серпухов, 1977/.*



О возможности криостатирования сверхпроводящих магнитных систем ускорителей с использованием струйных насосов для циркуляции жидкого гелия

Показаны преимущества циркуляционных систем криостатирования сверхпроводящих магнитов ускорителя. Рассмотрена возможность применения струйных насосов для циркуляции жидкого гелия. Струйные насосы имеют неограниченный ресурс, малую стоимость и практически не требуют обслуживания. Создана экспериментальная установка со струйным насосом. В результате теоретических и экспериментальных исследований предложена методика расчета криогенных систем, в основе действия которых лежит описанный принцип.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

On the Possibility of Cooling of Superconducting Magnetic Systems for Accelerators Using Jet Pumps to Circulate Liquid Helium

The advantages of circulation systems of cooling of superconducting magnets for accelerators are shown. The possibility of using jet pumps for liquid helium cooling is considered. The jet pumps can be in operation over an indefinite period of time, their cost is low, and, practically, they need no service. An experimental set-up with jet pumps is designed. As a result of theoretical and experimental investigations there was proposed the method of calculation of cryogenic systems, the principle described being its basis.

The investigations has been performed at the Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

Криостатирование сверхпроводящих магнитных систем ускорителей может осуществляться как погружением обмоток магнитов в кипящий гелий /т.н. "погружной" способ/, так и циркуляцией жидкости по расположенным внутри или около обмоток каналам /т.н. "циркуляционный" способ/. Второй способ имеет ряд преимуществ по сравнению с первым, в особенности при криостатировании крупных магнитных систем.

При использовании циркуляционного способа в системе содержится, как правило, меньшее количество жидкого гелия. Это упрощает и удешевляет оборудование для хранения газа, сокращает пусковой период системы. Кроме того, проще становится система эвакуации гелия.

Доступ к сверхпроводящим магнитам ускорителя при циркуляционном способе может обеспечиваться без существенного усложнения криостатов, тогда как при погружном способе разборные горизонтальные криостаты имеют весьма сложную конструкцию.

Циркуляционный способ исключает необходимость регулировать уровень кипящей жидкости в криостатах. Задача регулирования уровня становится все более сложной при увеличении протяженности системы. Из-за малой плотности жидкости приходится разбивать систему на ряд мелких криостатов и регулировать уровень в каждом из них в отдельности. В противном случае даже незначительный перепад давлений приведет к заметной разнице уровней.

И, наконец, при погружном способе из-за сложной конфигурации магнитов возможно скопление пузырьков пара, не имеющих доступа к поверхности жидкости. При

циркуляции жидкого гелия со сверхкритическим давлением такое явление исключено и, таким образом, нет опасности локального повышения температуры в результате перегрева пара.

На основании вышесказанного при выборе схемы криостатирования сверхпроводящего ускорителя авторы проекта /1/ отдают предпочтение циркуляционному способу. Более того, этот способ указывается в качестве единственно практически реального для системы большого масштаба.

В работе /2/ были рассмотрены схемы, в которых циркуляционный поток жидкого гелия получают с помощью механического насоса или системы, состоящей из компрессора и теплообменников.

В настоящем докладе анализируется возможность применения для циркуляции жидкого гелия струйного насоса. В отличие от механических устройств струйные аппараты исключительно просты, имеют ничтожную стоимость, обладают неограниченным ресурсом и практически не требуют обслуживания в процессе эксплуатации.

Принцип действия такого аппарата /рис. 1/ состоит в том, что поток сжатого газа разгоняется в сопле и при дальнейшем движении увлекает за собой инжектируемый поток. Смешанный поток, выходящий из камеры смешения, расширяется в диффузоре, при этом снижается его

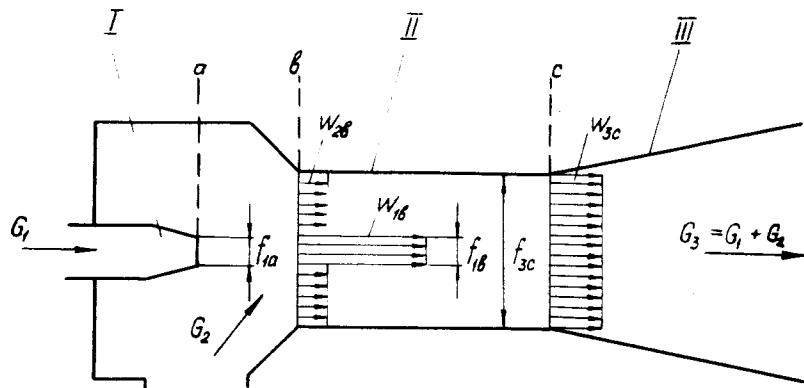


Рис. 1. Схема струйного насоса. I - сопло, II - цилиндрическая камера смешения, III - диффузор.

скорость и увеличивается статическое давление. Отношение расхода инжектируемого потока к расходу рабочего потока называют коэффициентом инжекции

$$u = \frac{G_2}{G_1} \quad /1/$$

Теория струйного насоса /3/ основана на использовании уравнения импульсов и коэффициентов скоростей, учитывающих потери в различных частях аппарата. Из уравнения импульсов для цилиндрической камеры смешения

$$\begin{aligned} \phi_2 (G_1 w_{1b} + G_2 w_{2b}) - (G_1 + G_2) w_{3c} = \\ = (p_{3c} - p_{1b}) f_{1b} + (p_{3c} - p_{2b}) f_{2b} \end{aligned} \quad /2/$$

и уравнения Бернулли для течения несжимаемой жидкости можно получить уравнение характеристики струйного насоса

$$\begin{aligned} \Delta p = \frac{w_{1a}^2}{v_{1a}} \left[ \frac{f_{1a}}{f_{3c}} \left( \phi_2 + u^2 \frac{f_{1a}}{f_{2b}} \frac{v_2}{v_{1a}} \left( \phi_2 - \frac{0,5}{\phi_4} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - (1+u)^2 \frac{f_{1a}}{f_{3c}} \frac{v_3}{v_{1a}} (1 - 0,5 \phi_3^2) \right] \right], \end{aligned} \quad /3/$$

где по /3/  $\phi_2 = 0,97$ ;  $\phi_3 = 0,90$ ;  $\phi_4 = 0,92$  - коэффициенты скоростей при движении жидкости соответственно для камеры смешения, диффузора и входного участка камеры смешения;  $G$  - массовый расход;  $w$  - скорость;  $p$  - давление;  $f$  - площадь сечения;  $v$  - удельный объем;  $\Delta p$  - напор струйного насоса,  $\Delta p = p_3 - p_2$ .

Цифровой индекс относится к потоку, буквенный - указывает сечение аппарата /см. рис. 1 и 2/.

Оптимальное отношение сечений сопла и цилиндрической камеры смешения, соответствующее максимальному напору, определяется из условия  $d(\Delta p) / d(f_{1a} / f_{3c}) = 0$ .

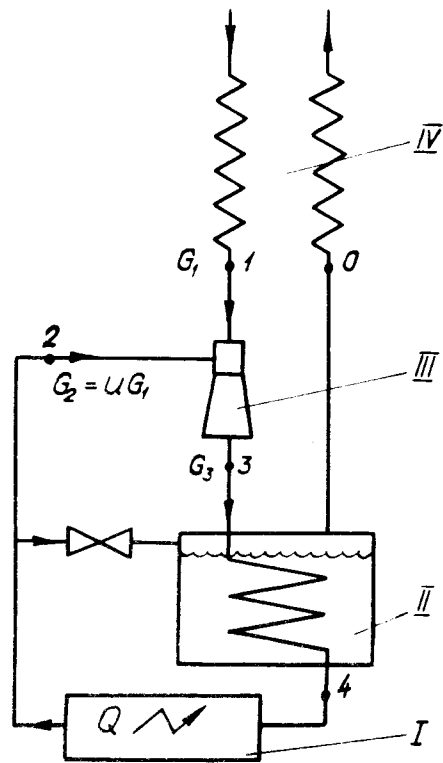


Рис. 2. Схема циркуляции жидкого гелия в системе со струйным насосом. I - криостатируемый объект, II - сборник жидкого гелия, III - струйный насос, IV - теплообменник.

После преобразования можно получить

$$\left(\frac{f_{1a}}{f_{3c}}\right)_0 = \frac{\phi_2 + u^2 - \frac{v_2}{v_{1a}} (\phi_2 - \frac{0,5}{\phi_4^2}) \left\{ \frac{1}{[1 - (f_{1a}/f_{3c})_0]^2} - 1 \right\}}{(1+u)^2 \frac{v_3}{v_a} (2 - \phi_2^2)} \quad /4/$$

Наименьший из трех корней уравнения даст нужное решение. Это решение можно получить итерационным методом, принимая начальное приближение равным нулю. Достижимый напор при заданном коэффициенте инжекции определяется путем подстановки в /3/ величины  $(f_{1a}/f_{3c})_0$ .

Параметры  $w_{1a}$  и  $v_{1a}$  на срезе сопла определяют по параметрам торможения рабочего потока при помощи термодинамических таблиц или диаграмм и с использованием уравнения течения с трением для реального газа

$$w_{1a} = \phi_1 \sqrt{2\Delta i_s} \quad /5/$$

где  $\Delta i_s$  - разность энтальпий рабочего потока при изэнтропном течении;  $\phi_1$  - коэффициент скорости при движении потока гелия в сопле. По нашим измерениям, в среднем  $\phi_1 = 0,94$ .

Схема циркуляционной системы криостатирования представлена на рис. 2. В качестве рабочего потока используется сжатый газ, выходящий из концевой теплообменника рефрижератора. Смешанный поток при сверхкритическом давлении после охлаждения в змеевике до температуры жидкого гелия подается в объект. На выходе из объекта поток разделяется на две части, одна из которых направляется в струйный насос, а другая, равная  $G_1$ , дросселируется в сборник.

Расход сжатого газа определяется уравнением энергетического баланса

$$G_1 = \frac{Q}{i_0 - i_1} \quad /6/$$

где  $G$  - тепловая нагрузка;  $i_0$ ,  $i_1$  - энтальпии в соответствующих точках установки.

В зависимости от допустимого нагрева жидкого гелия  $\Delta T = T_2 - T_4$  необходимый коэффициент инжекции определяется соотношением

$$u \geq \frac{i_0 - i_1}{c_{4-2} \Delta T} - 1 \quad /7/$$

где  $c_{4-2}$  - средняя удельная теплоемкость жидкого гелия в интервале параметров от точки 4 до точки 2.

На рис. 3 зависимость /7/ показана графически. Как видно из графика, для получения величины  $\Delta T = 0,2 \div 0,3\text{K}$  необходимо обеспечить коэффициент инжекции  $8 \div 4$ .

Чтобы выяснить, возможно ли получение таких коэффициентов инжекции, струйный насос был испытан на стенде, работающем совместно с гелиевым рефрижератором холодопроизводительностью 240 Вт. В наших экспериментах расход жидкого гелия в  $5 \div 10$  раз превышал расход сжатого газа  $G_1$ . Поток жидкости, воспринимающая соответствующую холодопроизводительности тепловую нагрузку, нагревался лишь на  $\Delta T = 0,15 \div 0,25\text{K}$ . При

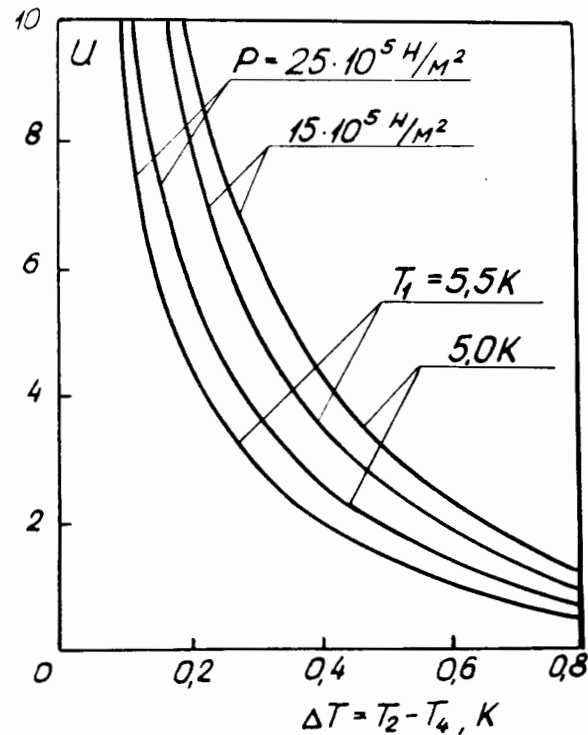


Рис. 3. Зависимость коэффициента инжекции от допустимого нагрева жидкого гелия.

этом напор струйного насоса изменялся в пределах  $\Delta p = 0,15 \div 0,40 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ .

На рис. 4 приводится сравнение одной из полученных экспериментальных характеристик с расчетной. Как видно из рисунка, результаты расчета характеристики /3/ по уравнению хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Заштрихованная зона соответствует неустойчивому режиму работы и резкому снижению эффективности струйного насоса. Исследования показали, что для того, чтобы исключить подобное явление, нужно выполнить условие

$$\frac{l}{d_{1a}} < \frac{1+u}{0,31} \quad /8/$$

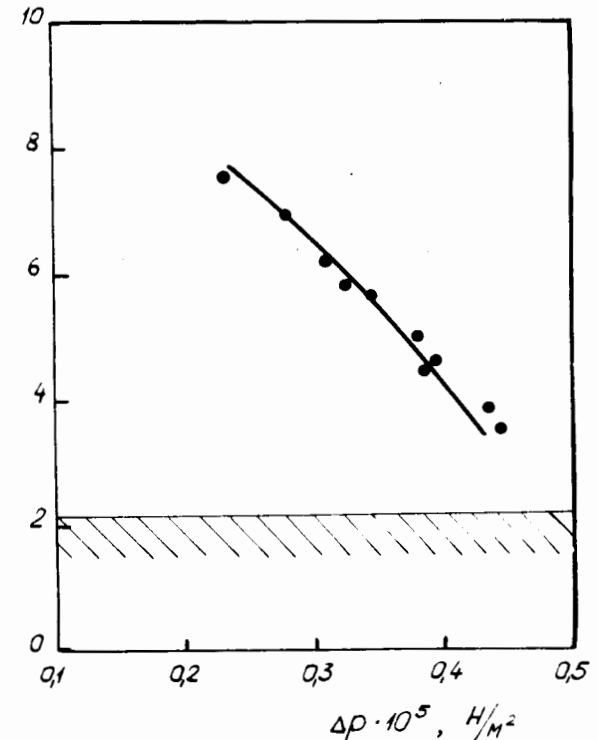


Рис. 4. Экспериментальная и расчетная характеристики струйного насоса.  $Q = 200 \text{ Вт}$ ;  $G_1 = 28,6 \text{ г/с}$ ;  $p_1 = 19 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;  $T_1 = 5,55\text{K}$ ;  $p_2 = 4,0 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ .

где  $l$  - расстояние между сечениями "а" и "б" струйного аппарата;  $d_{1a}$  - выходной диаметр сопла.

На основе соотношений /3/ и /4/ нами рассчитаны параметры циркуляционного контура и оптимальные геометрические размеры струйного насоса для различных случаев. Результаты расчетов приведены в таблице. При работе с таблицей исходными данными являются давление  $p_1$  и температура  $T_1$  сжатого газа на входе в сопло, а также допустимый нагрев жидкого гелия  $\Delta T$ . По таблице определяют необходимую величину коэффициента инжекции  $u$ , достижимый напор струйного насоса  $\Delta p$ , расход рабочего потока  $\bar{G}_1$  и площадь выходного сечения сопла  $f_{1a}$  на единицу тепловой нагрузки, а также оптимальное отношение сечений  $(f_{1a}/f_{3c})_0$  сопла и цилиндрической камеры смешения.

Расстояние от среза до входного сечения цилиндрической камеры смешения определяют из условия /8/. Другие осевые размеры - по рекомендациям /3/: угол раствора входного участка камеры смешения -  $60 \div 90^\circ$ ; угол раствора диффузора -  $8 \div 10^\circ$ ; длина цилиндрической камеры смешения -  $/6 \div 10/d_{3c}$ ; длина диффузора -  $/6 \div 7/(d_3 - d_{3c})$ , где  $d_3$  - диаметр выходного сечения диффузора,  $d_{3c}$  - диаметр цилиндрической камеры смешения.

На рис. 5 представлены принципиальные схемы криостатирования кольца ускорителя: первая - с механическими насосами, вторая - со струйными. Охлажденная до температуры кипящего гелия жидкость при сверхкритическом давлении подается в магнитную систему, на выходе из магнитной системы поток сжимается в механическом или струйном насосе и снова охлаждается в сборнике с кипящим гелием. Существенное различие этих схем состоит в том, что в первом случае в цикл извне вносится затрачиваемая на привод механических насосов работа и для ее компенсации требуется дополнительная холодопроизводительность рефрижератора. Во втором случае требуемая холодопроизводительность не увеличивается, ее величина равна тепловой нагрузке от магнитной системы.

Так, чтобы обеспечить полученные на стенде параметры при использовании механического насоса с к.п.д.

Таблица

$$p_0 = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2, \quad p_2 = 3,0 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$$

$p_1$ , $10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$T_1$ , К	$\Delta T$ , К	$u$	$\Delta p$ , $10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$\bar{G}_1$ , $10^3 \frac{\text{кг/сек}}{\text{см}}$	$f_{1a}$ , $10^3 \frac{\text{м}^2}{\text{см}}$	$(\frac{f_{1a}}{f_{3c}})_0$
15.0	5.00	.200	9.48	.136	.0885	.558	.0147
15.0	5.00	.300	6.04	.269	.0885	.558	.0293
15.0	5.00	.400	4.32	.430	.0885	.558	.0471
15.0	5.00	.500	3.30	.612	.0885	.558	.0674
15.0	5.20	.200	8.84	.155	.0947	.602	.0167
15.0	5.20	.300	5.62	.304	.0947	.602	.0331
15.0	5.20	.400	4.01	.484	.0947	.602	.0529
15.0	5.20	.500	3.05	.685	.0947	.602	.0753
15.0	5.40	.200	8.24	.174	.1015	.655	.0150
15.0	5.40	.300	5.23	.341	.1015	.655	.0374
15.0	5.40	.400	3.72	.539	.1015	.655	.0596
15.0	5.40	.500	2.82	.760	.1015	.655	.0844
15.0	5.60	.200	7.61	.199	.1097	.720	.0219
15.0	5.60	.300	4.81	.386	.1097	.720	.0428
15.0	5.60	.400	3.41	.606	.1097	.720	.0677
15.0	5.60	.500	2.58	.851	.1097	.720	.0957
20.0	5.00	.200	7.52	.266	.1128	.601	.0207
20.0	5.00	.300	4.75	.512	.1128	.601	.0403
20.0	5.00	.400	3.42	.798	.1128	.601	.0631
20.0	5.00	.500	2.61	1.119	.1128	.601	.0891
20.0	5.20	.200	6.95	.302	.1223	.659	.0238
20.0	5.20	.300	4.41	.577	.1223	.659	.0457
20.0	5.20	.400	3.15	.852	.1223	.659	.0712
20.0	5.20	.500	2.35	1.243	.1223	.659	.0998
20.0	5.40	.200	6.41	.344	.1329	.725	.0273
20.0	5.40	.300	4.06	.649	.1329	.725	.0519
20.0	5.40	.400	2.89	1.000	.1329	.725	.0805
20.0	5.40	.500	2.19	1.383	.1329	.725	.1120
20.0	5.60	.200	5.85	.397	.1461	.807	.0317
20.0	5.60	.300	3.70	.741	.1461	.807	.0596
20.0	5.60	.400	2.63	1.132	.1461	.807	.0917
20.0	5.60	.500	1.99	1.557	.1461	.807	.1270
25.0	5.00	.200	5.62	.512	.1563	.738	.0317
25.0	5.00	.300	3.60	.938	.1563	.738	.0585
25.0	5.00	.400	2.59	1.415	.1563	.738	.0889
25.0	5.00	.500	1.98	1.940	.1563	.738	.1227
25.0	5.20	.200	5.12	.589	.1741	.829	.0366
25.0	5.20	.300	3.27	1.072	.1741	.829	.0672
25.0	5.20	.400	2.35	1.600	.1741	.829	.1009
25.0	5.20	.500	1.78	2.184	.1741	.829	.1377
25.0	5.40	.200	4.67	.676	.1952	.942	.0425
25.0	5.40	.300	2.95	1.219	.1952	.942	.0772
25.0	5.40	.400	2.12	1.806	.1952	.942	.1152
25.0	5.40	.500	1.60	2.446	.1952	.942	.1571
25.0	5.60	.200	4.23	.778	.2227	1.090	.0495
25.0	5.60	.300	2.63	1.405	.2227	1.090	.0902
25.0	5.60	.400	1.86	2.075	.2227	1.090	.1341
25.0	5.60	.500	1.39	2.790	.2227	1.090	.1814

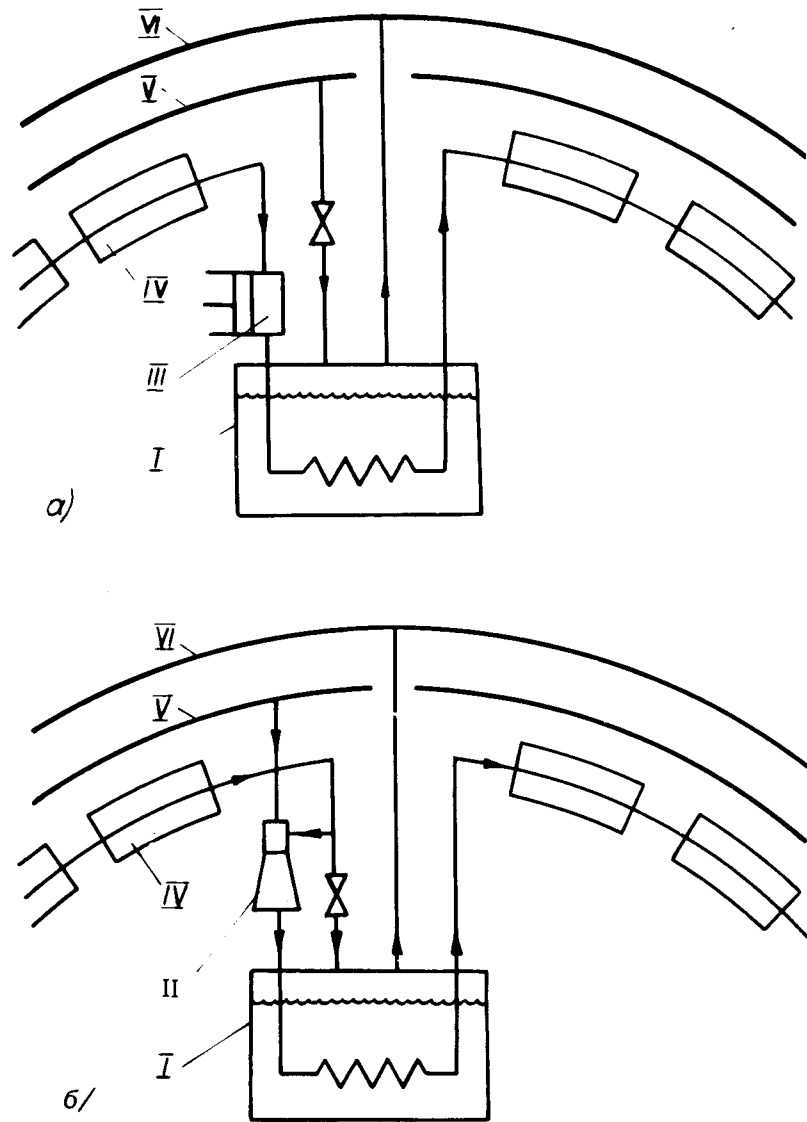


Рис. 5. Схемы криостатирования сверхпроводящих магнитных систем ускорителей: а/ с механическими насосами, б/ со струйными насосами. I - сборник жидкого гелия, II - струйный насос, III - механический насос, IV - магнит, V - коллектор сжатого газа, VI - коллектор возврата пара.

$\eta = 0,5$  пришлось бы увеличить холодопроизводительность работающего по циклу с дросселированием рефрижератора на 50%. Следовательно, замена дросселя струйным насосом не только повышает надежность циркуляционной системы, но и уменьшает удельные энергозатраты.

Следует, однако, отметить, что включение струйного насоса в схему рефрижератора исключает возможность повышения холодопроизводительности путем установки детандера на потоке газа, выходящем из конечного теплообменника. Поэтому для окончательной оценки схемы со струйным насосом целесообразно сравнить со схемой с детандером и механическим насосом /рис. 6/.

Повышение холодопроизводительности при отводе работы детандера  $L^-$  и ее снижение при подводе работы насоса  $L^+$  приводит к тому, что получаемые в схеме со струйным насосом параметры - тепловая нагрузка  $Q$ , повышение температуры жидкости  $\Delta T$  и напор  $\Delta p$  - достигаются при расходе сжатого газа  $G_1^M$ , отличающемся от  $G_1$ , вычисленного из /6/. Для оценки изменения расхода сжатого газа и, в конечном итоге, удельных энергозатрат можно ввести коэффициент

$$\alpha = \frac{G_1^M}{G_1} = \frac{Q + L^+ - L^-}{Q} \quad /9/$$

В зависимости от к.п.д. машин этот коэффициент может быть больше или меньше единицы.

При параметрах сжатого газа  $p_1 = 20 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  и  $T_1 = 5,0 \div 5,5 \text{ К}$  и к.п.д. детандера 70% зависимость  $\alpha$  от  $\Delta T$  и к.п.д. механического насоса  $\eta$  представлена на графике рис. 6. Видно, что с применением струйного насоса может быть связан некоторый перерасход энергии. Например, при  $\Delta T = 0,25 \text{ К}$  и  $\eta = 0,5$  перерасход составляет 25%.

Однако, несмотря на выигрыш в удельных энергозатратах, схема с механическими устройствами может не иметь экономических преимуществ. Техико-экономический анализ показал, что применение струйного насоса ввиду его простоты и надежности позволяет снизить расходы на ремонт и эксплуатацию оборудования, а также уменьшить капитальные вложения. В конечном итоге экономические показатели схем со струйным насосом



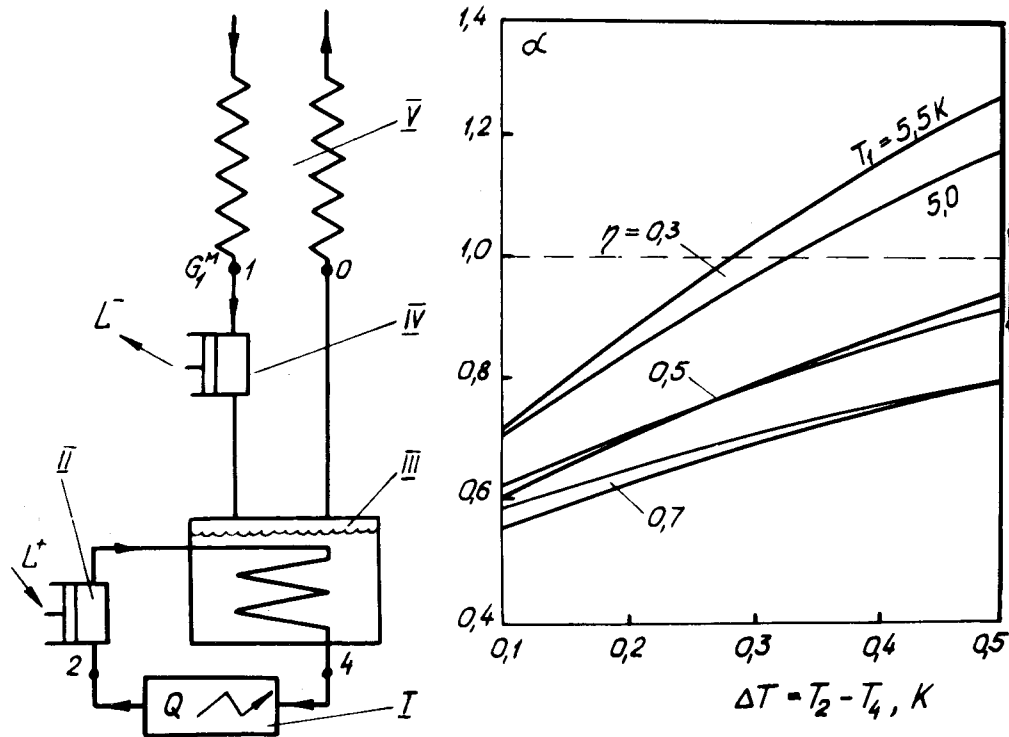


Рис. 6. Схема с детандером и механическим насосом и ее сравнительная характеристика. I - криостатируемый объект, II - механический насос, III - сборник жидкого гелия, IV - детандер, V - теплообменник.

и механическими устройствами оказываются приблизительно одинаковыми.

Между тем важное преимущество струйного насоса заключается в том, что такие аппараты с оптимальными для каждого потребителя параметрами могут изготавливаться в любой мастерской и поставляться в очень короткий срок. Отпадает необходимость разработки сложных механических устройств, работающих при температуре жидкого гелия, их испытаний и освоения промышленностью.

Таким образом, наряду с известными схемами, в которых для циркуляции жидкого гелия применяются механические циркуляторы, при криостатировании сверхпроводящих магнитных систем можно использовать схему со струйными насосами.

#### Литература

1. *The Energy Doubler*. FNAL, Batavia, 1976.
2. Dean J.W. RHEL/M, A22, 1971.
3. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. Энергия., М., 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 июня 1977 года.