

2430 / 2-78

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗУ5Н
0-345

13 - 9597

В.П.Овсянников

ИССЛЕДОВАНИЕ
КРИОГЕННО-МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО ИСТОЧНИКА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

1976

13 - 9597

В.П.Овсянников

ИССЛЕДОВАНИЕ
КРИОГЕННО-МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО ИСТОЧНИКА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Овсянников В.П.

13 - 9597

Исследование криогенно-магнитной системы электроннолучевого ионного источника

Испытана криогенно-магнитная система, которая находится в вакууме и термостатируется с помощью теплового моста с ванной жидкого гелия. Исследованы процессы, происходящие в системе при изменениях тока. Экспериментально оценены тепловыделения в обмотке и теплопроводность контактов "медь-медь" при гелиевой температуре. Обнаружены причины, приводящие к деградации соленоида.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований

Дубна 1976

I. ВВЕДЕНИЕ

Для формирования электронных пучков с плотностью тока $\sim 1000 \text{ А/см}^2$ и энергией до 10 кэВ требуются магнитные поля в несколько T . Такие магнитные фокусирующие системы могут быть созданы с применением сверхпроводящих соленоидов. При экспериментальной разработке из всех известных методов стабилизации сверхпроводящих магнитных систем заслуживает внимания метод, при котором сверхпроводящий соленоид расположен вне ванны с жидким гелием и имеет контакт с последней через материал, хорошо проводящий тепло ^{1, 2/}.

II. КОНСТРУКЦИЯ КРИОГЕННО-МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Особенностью криогенно-магнитной системы является то, что все основные узлы: сверхпроводящий соленоид, перемычка, токоведущие шины и спаи - охлаждаются за счет теплопроводности посредством контакта с гелиевым криостатом и непосредственно жидким гелием не омываются. Возможность такого метода термостатирования обусловлена применением внутренне стабилизированных сверхпроводников ^{1/}.

При создании криогенно-магнитной системы источника "Крион-2" использована часть установки, предназначенной для источника "Крион-1" ^{2/}. Конструкция основных узлов обсуждаемой системы аналогична конструкции установки "Крион-1", некоторые отличия имеют сверхпроводящий соленоид, сверхпроводящая перемычка и спаи.

Общий вид криогенно-магнитной системы электроннолучевого ионного источника представлен на *рис. 1* ^{2/}.

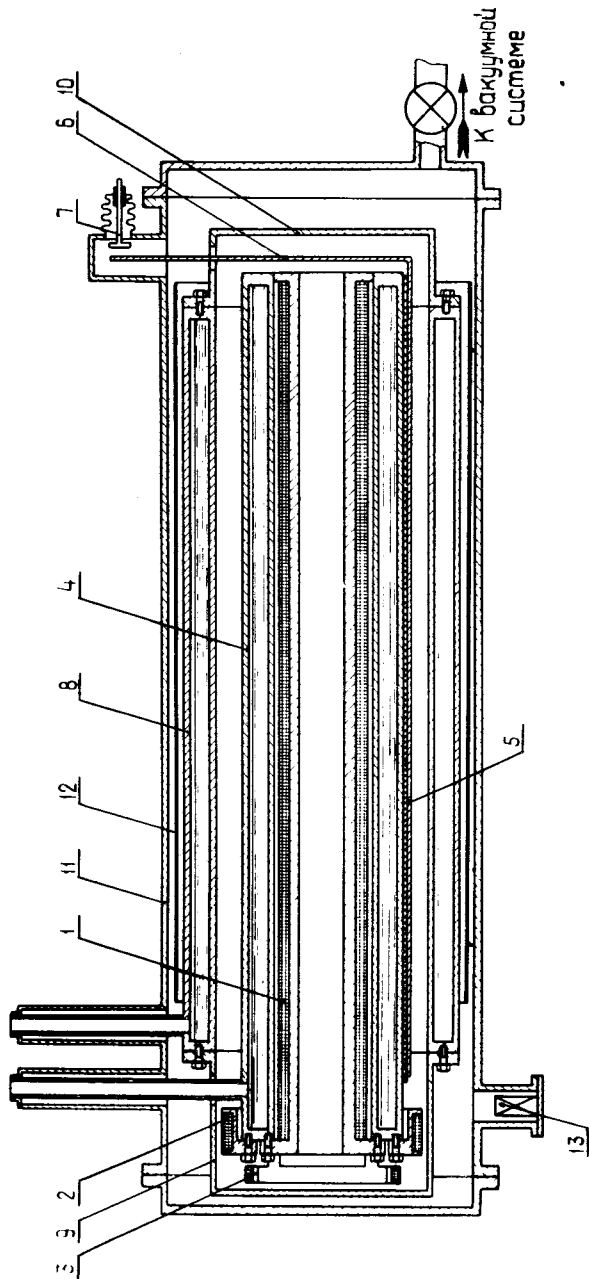


Рис. 1. Общий вид криогенно-магнитной системы.

Сверхпроводящий соленоид /1/, сверхпроводящая перемычка /2/ и промежуточное кольцо /3/, на которое наклеены спай, расположены в вакууме коаксиально с гелиевым криостатом /4/, их корпуса прижаты болтами к торцу последнего. Токоведущие шины /5/ приклеены через изоляцию к наружной поверхности гелиевого криостата. С одной стороны к ним припаяны жесткие медные токовводы /6/, оканчивающиеся против подвижных электродов контактора /7/. С другой стороны к токоведущим шинам припаяны отрезки сверхпроводящего кабеля, идущие к спаям. Коаксиально с гелиевым расположен азотный криостат /8/. Торцевые радиационные экраны /9,10/, прижатые к нему болтами, снижают теплоприток к частям установки, имеющим гелиевую температуру. Для уменьшения теплопритока излучением к азоту между цилиндрическими поверхностями азотного криостата и вакуумного кожуха /11/ поставлен "плавающий" экран из полированной меди /12/.

1.1. Сверхпроводящий соленоид

Основные параметры соленоида приведены в табл. 1. Обмотка сверхпроводящего соленоида состоит из 10 слоев сверхпроводника, намотанного на медный корпус с усилием 2 кг. Слои обмотки изолированы друг от друга и от корпуса лавсановой пленкой толщиной 50 мкм. Сверху обмотка зафиксирована бандажом, представляющим собой два слоя проволоки из нержавеющей стали диаметром 1 мм, намотанной с усилием 5 кг. Тепловой контакт обеспечен прижимом фланца корпуса соленоида к торцу гелиевого криостата 12 болтами М6 с общим расчетным усилием 2000 кг.

1.2. Сверхпроводящая перемычка и спай

Сверхпроводящая перемычка представляет собой катушку, намотанную на медный корпус бифилярно и залитую эпоксидной смолой. Общая длина кабеля перемычки

Таблица 1

Наименование	Величина
1. Длина обмотки	120 см
2. Внутренний диаметр обмотки	50 мм
3. Внешний диаметр обмотки	66 мм
4. Материал сверхпроводника	HT-50
5. Общая длина обмотки	3000 м
6. Общее число витков в обмотке	15400
7. Индуктивность соленоида	0,65 Гн
8. Запасенная энергия при токе 150 А	7,8 кДж
9. Площадь поперечного сечения материала корпуса соленоида	10 см

составляет ~150 м. Сопротивление при комнатной температуре составляет 7 Ом. Нагреватель представляет собой несколько витков константановой проволоки, уложенной на верхний слой обмотки. Концы обмотки переемычки спаяны с концами обмотки соленоида и участками проводника, идущими от токоведущих шин индием без оголения сверхпроводящих жил. Длина каждого из спаев составляет 230 см.

1.3. Токоведущие шины

Токоведущие шины представляют собой две комбинированные ленты, приклеенные к гелиевому криостату через слой лакоткани клеем БФ-2. Участок ленты, к которому припаивается медный токоввод, выполнен из медной фольги толщиной 0,01 мм и имеет длину 20 см. Ширина составляет 12 см. Другой участок ленты выполнен из станида ниобия (Nb_3Sn), плакированного медью. К этому участку на длине 10 см припаяны концы кабеля, идущие к спаям.

1.4. Контроль температуры

Для контроля за температурой датчики устанавливаются на бандаже соленоида, на корпусе сверхпроводящей переемычки и на кольце, к которому приклеены спаи. Термопары медь - медь - железо использовались для измерения температуры в диапазоне 300-78° К. В диапазоне 78 - 4,2° К температура контролируется угольными резисторами.

2. Испытания криогенно-магнитной системы

2.1. Охлаждение системы

Предварительная откачка установки осуществляется вакуумной системой, включающей в себя форвакуумный насос, диффузионный паромасляный насос и ловушку

Поста. После достижения вакуума $1 \cdot 10^{-2}$ - $8 \cdot 10^{-3}$ Торр, начинается охлаждение системы до азотной температуры. Охлаждение производится парами жидкого азота, направляемыми последовательно сначала в гелиевый, а затем в азотный криостаты. Охлаждение гелиевого криостата и сверхпроводящего соленоида от азотной до гелиевой температуры производится парами жидкого гелия. Процесс охлаждения происходит следующим образом /рис. 2/.

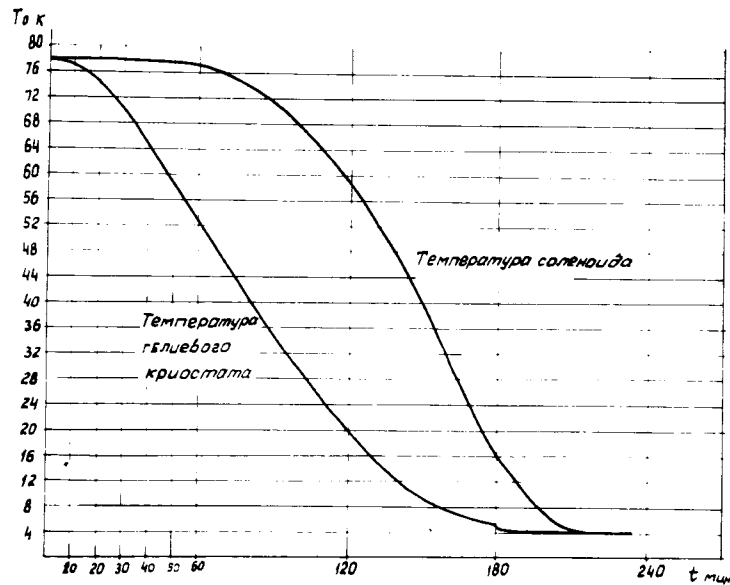


Рис. 2. Охлаждение системы от азотной до гелиевой температуры.

Сначала растет разница температур между гелиевым криостатом и обмоткой соленоида. При этом поддерживается определенное давление паров гелия. После достижения температуры криостата, равной $6^\circ K$, а соленоида - $16^\circ K$ начинается заливка жидкого гелия. В дальнейшем температура обмотки понижается в соответствии с собственной теплопроводностью и теплопроводностью контактов. После заливки жидкого гелия давление в ус-

тановке, измеренное датчиком, установленным на вакуумном кожухе, равно $8 \cdot 10^{-9}$ Торр. Скорость испарения жидкого гелия равна $200 \text{ см}^3/\text{ч}$, мощность теплопритоков к нему составляет $\sim 0,143 \text{ Вт}$. Испаряемость жидкого азота при залитом гелии уменьшается до величины $270 \text{ см}^3/\text{ч}$.

2.2. Ввод тока в соленоид

Для изучения закономерностей, возникающих при вводе тока в обмотку, синхронно, с помощью шестиканального самописца записывались показания датчиков температуры, изменения тока и напряжение, возникающее на потенциальных концах. Диаграммы трех режимов представлены на рис. 3 /а,б,в/. Так как соленоид рабо-

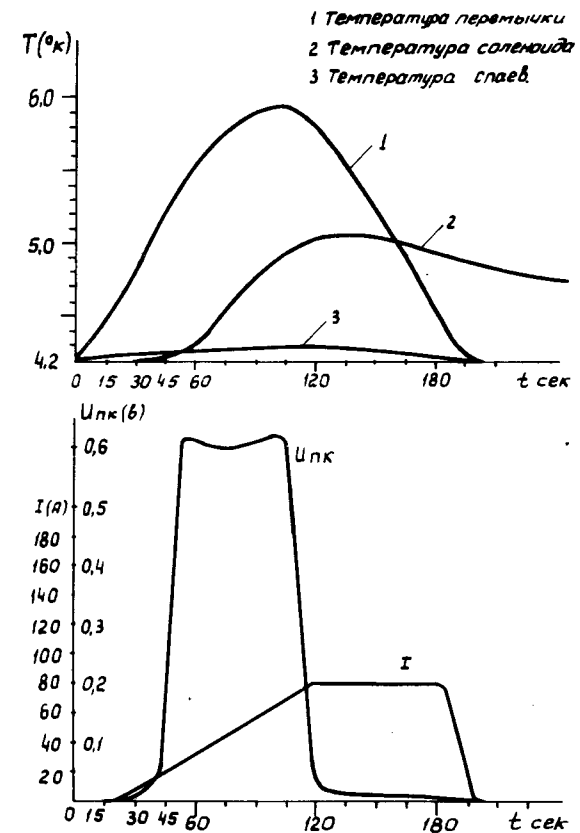
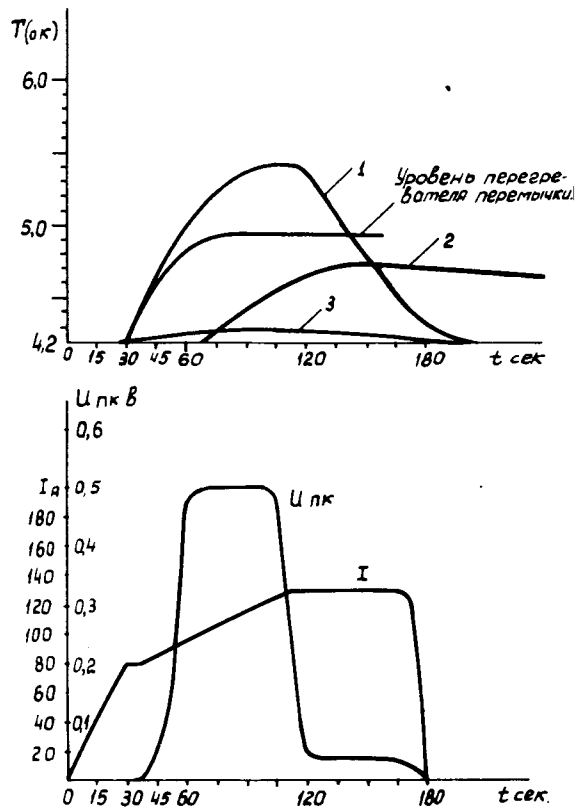


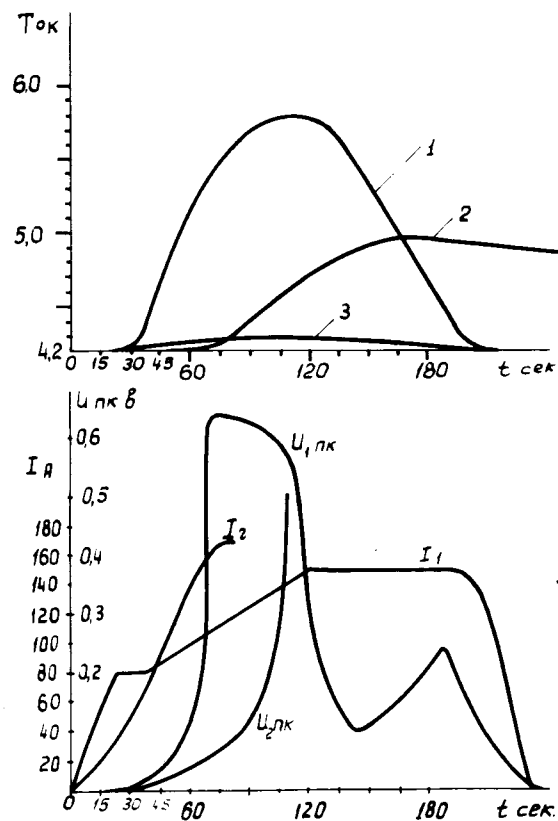
Рис. 3. Изменения в системе при вводе тока в соленоид.



тает в короткозамкнутом режиме, любое изменение тока в обмотке при помощи внешнего источника невозможно без включения нагревателя сверхпроводящей переключки. Мощность источника питания нагревателя, необходимая для перевода переключки в нормальное состояние, составляет $2,33 \text{ Вт}$. При этом непосредственно в переключке выделяется $1,7 \text{ Вт}$.

Измерение мощности, выделяющейся в переключке, с одновременной фиксацией температуры корпуса переключки было произведено по изменению скорости испарения жидкого гелия при различной мощности источника питания / табл. 2/.

В результате этих измерений определена проводимость контактов "медь - медь" при выбранном способе прижима, составившая величину, равную $\sim 2,8 \text{ Вт/град}$. После перехода переключки в нормальное состояние начинается процесс изменения тока в системе, сопровождающийся ростом напряжения на потенциальных концах, нагревом обмотки соленоида и дополнительным перегревом сверхпроводящей переключки /см. рис. 3/.



Дополнительный перегрев переключки объясняется тем, что э.д.с. индукции, возникающая на концах обмотки соленоида, приложена на сопротивление переключки, на-

ходящейся в нормальном состоянии. На рис. 4 представлены зависимости температуры соленоида и сверхпроводящей перемычки /кривые 1,2,3/ от различной скорости изменения тока в пределах 0 - 80 А. Чтобы исключить перегрев перемычки, можно либо выключать нагреватель перемычки сразу же после начала изменений тока в соленоиде /рис.4,3' /, либо увеличивать длину обмотки перемычки, или удалить медь матрицы /5/.

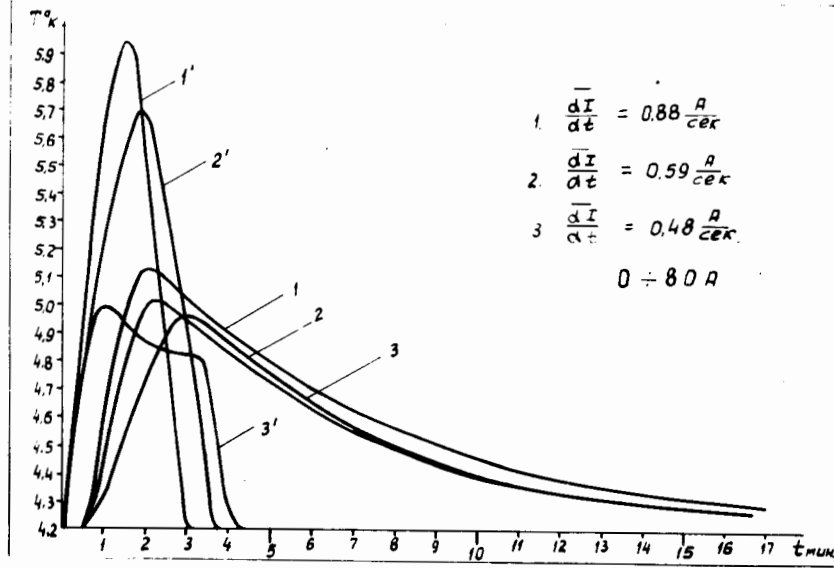


Рис. 4. Перегрев сверхпроводящей перемычки.

Как известно, потери в сверхпроводниках при изменениях тока и внешнего поля складываются, в основном, из гистерезисных потерь и потерь за счет вихревых токов /6/. На рис. 5 представлены зависимости температуры обмотки соленоида от времени при двух различных параметрах: средней скорости изменения тока dI/dt и величины магнитного поля ΔH . Средние значения теплоемкости материалов сверхпроводника и матрицы в пределах 4,2-5° К представлены в табл. 3. Для получения оценок теплопроводности обмотки предпо-

Таблица 2

Мощность источника Вт	Температура корпуса перемычки К	Скорость испарения жидкого гелия, л/час	Мощность в перемычке Вт	Проводимость контакта Вт/град
-	4,339	411	0,41	2,94
1,2	4,475	711	0,71	2,58
2,33	4,769	1700	1,7	2,98

Таблица 3

50%Nb - 50%Ti		Медь		42%Nb - Ti - 58%Cu	
К	Вт	К	Вт	К	Вт
4,2 К	5 К	4,2 К	5 К	4,2-4,73 К	4,2-4,54 К
$0,5 \frac{мДж}{г.град}$	$0,9 \frac{мДж}{г.град}$	$0,104 \frac{мДж}{г.град}$	$0,16 \frac{мДж}{г.град}$	$0,37 \frac{мДж}{г.град}$	$0,309 \frac{мДж}{г.град}$

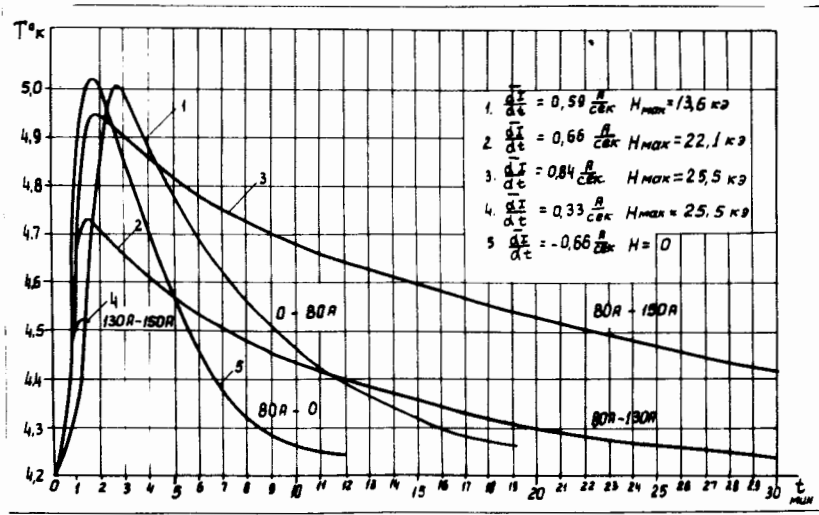


Рис. 5. Изменение температуры соленоида.

ложим в этом интервале температур теплоемкость сверхпроводящего кабеля неизменной.

На рис. 6 представлена зависимость $\ln \frac{T(t) - T_0}{T_{max} - T_0}$ / $T(t)$ - текущая температура, T_0 - температура корпуса, равная 4,2°K, T_{max} - начальная температура обмотки/ от времени охлаждения, из которой следует вывод о том, что теплопроводность обмотки соленоида уменьшается при изменении поля от 0 до 25 кЭ примерно в пять раз. Абсолютные значения удельной и полной теплопроводности для принятых средних значений теплоемкости представлены в табл. 4. Таким образом, скорости тепловой диффузии малы, что позволяет с достаточной точностью определить величину тепловыделений из экспериментальных кривых. Полученные результаты представлены в табл. 5.

Вклад вихревых потерь может быть оценен из экспериментальных кривых, представленных на рис. 4. Известно ^{6,7/}, что мощность вихревых потерь в 1 м проводника зависит от величины

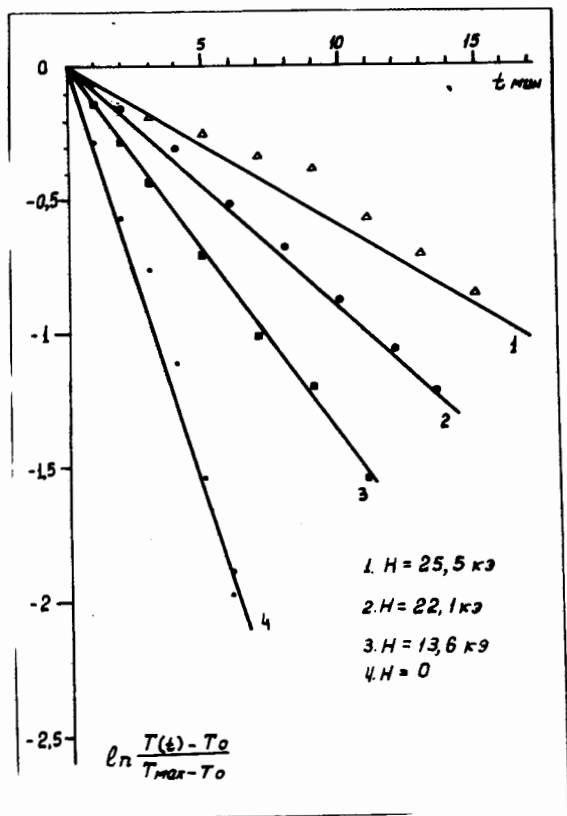
$$\beta = \ell \rho \dot{B}^2,$$

Таблица 4

Удельная теплопроводность		Полная теплопроводность	
H = 0	H = 25,5	H = 0	H = 25,5
9,5 $\frac{\text{мкВт}}{\text{см.град.}}$	1,84 $\frac{\text{мкВт}}{\text{см.град}}$	22,37 $\frac{\text{мВт}}{\text{град}}$	4,24 $\frac{\text{мВт}}{\text{град}}$

Таблица 5

Изменение поля H, кЭ	Изменение температуры ТК°	Тепловыделения, Дж	
		Средняя теплоемкость кабеля в интервале температур, мДж/г.град	Тепловыделения, Дж
13,6	4,2 - 5,02	0,37	2,73
8,5	4,2 - 4,73	0,335	1,59
3,4	4,2 - 4,54	0,309	0,89
11,9	4,2 - 4,95	0,37	2,49
13,6	4,2 - 5,04	0,37	2,79
	вывод тока		



l_p - шаг вкрутки, \dot{V} - скорость изменения поля/.

Так как гистерезисные тепловыделения при одинаковом ΔH постоянны, то дополнительный нагрев обмотки обусловлен только вихревыми потерями. Результаты измерений представлены в табл. 6. При принятых скоростях заводки тока в соленоид основной нагрев обмотки обусловлен гистерезисными потерями. Изменение теплопроводности обмотки можно объяснить действиями пондеромоторных сил и недостаточными усилиями бандажа. В результате происходит ухудшение теплопроводности контакта "обмотка - корпус соленоида". Учитывая величину перегрева обмотки, можно ожидать устойчивую

Таблица 6

Скорость изменения поля, Гс/с	Средняя мощность за время ввода, мВт	Изменение мощности, мВт		
		$P_1 - P_2$	$P_1 - P_3$	$P_2 - P_3$
1. 149,4	33,95	1,38	18,71	4,91
2. 100	20,15			
3. 81	15,24			
Изменения скорости роста поля				
Средняя мощность вихревых потерь, мВт				
$(V_1:V_2)^2$	$(V_1:V_3)^2$	$(V_2:V_3)^2$	$V_3 = 81 \text{ Гс/с}$	$V_2 = 100 \text{ Гс/с}$
2,22	3,31	1,51	4,27	6,28

работу соленоида при токе 200 А и напряженности магнитного поля 34 кЭ. Максимальный ток, введенный в соленоид, при котором был получен короткозамкнутый режим, составил величину 168 А.

В дальнейшем, после длительной эксплуатации системы, рабочий ток пришлось уменьшить до величины 130 А. При вводе в соленоид 80 А /рис. 3а/ после прекращения изменения тока показания потенциальных концов падают до некоторой величины, характеризующей собой участок нормальной зоны на токоведущих шинах. При вводе тока в диапазоне 80-130 А эта величина несколько больше и тоже постоянна со временем, что говорит о стационарных процессах, происходящих на токоведущих шинах /рис. 3б/.

При вводе тока в диапазоне 80 - 150 А наблюдается рост показаний потенциальных концов и на участке, когда изменения тока уже прекращены /рис. 3в/.

Последнее может быть объяснено тем, что тепловой контакт токоведущих шин с гелиевым криостатом недостаточен для снятия джоулева тепла, выделяющегося в нормальной зоне шины. В результате происходит рост нормальной зоны и ее распространение вдоль токоведущих шин. На рис.3в представлена скорость роста нормальной зоны при токе 168 А, пропускаемом через сверхпроводящую перемычку. Таким образом, при вводе тока в систему 150 А и более появляется некоторое критическое время ввода, превышение которого приводит к переходу всей системы в нормальное состояние. На рис. 7 представлены изменения температуры соленоида, перемычки и спаев при переходе системы в нормальное состояние. Кривые 1,2,3 характеризуют перегревы в системе, перешедшей в нормальное состояние при вводе в соленоид 150 А. Запасенная энергия в соленоиде равна 7,8 кДж. Кривые 1', 2', 3' относятся к случаю перехода в нормальное состояние перемычки при исследовании распространения нормальных зон по токоведущим шинам. Неоднократные переходы сверхпроводящей магнитной системы в нормальное состояние не привели к выходу ее из строя.

Таким образом, при разработке криогенно-магнитных систем, использующих контактный метод термостабилизации, следует обращать внимание на правильный выбор

сопротивления закорачивающей перемычки на усилие, с которым наматывается бандаж при изготовлении соленоида, и на качество теплового контакта между токоведущими шинами и корпусом гелиевого криостата.

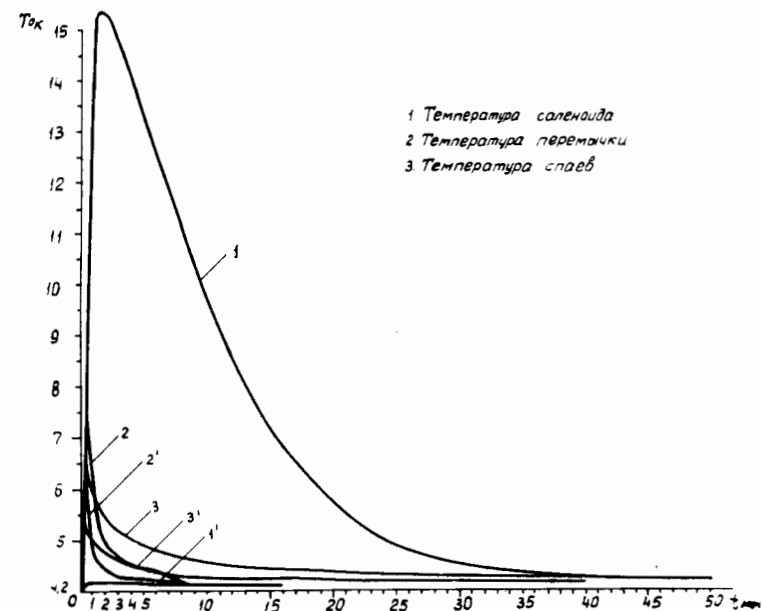


Рис. 7. Изменение температуры в системе при переходе в нормальное состояние.

В заключение автор искренне благодарит ближайших сотрудников: Е.Д.Донца - за руководство работой, И.А.Пикина - за участие в разработке системы и за проведение криогенно-вакуумных испытаний, В.В.Сальникова - за участие в наладке системы, сотрудников криогенного отдела А.Г.Зельдовича, Ю.А.Шишова, Х.Менке, Д.Кабата - за обсуждение полученных результатов, а также сотрудников механических мастерских ЛВЭ ОИЯИ за изготовление узлов криогенно-магнитной системы и помощь в ее наладке.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Г.Зельдович, Ю.А.Шишов. Сообщение ОИЯИ, 8-7018, Дубна, 1973.
2. В.Г.Аксенов, Е.Д.Донец, А.Г.Зельдович, А.И.Пикин, Ю.А.Шишов. Сообщение ОИЯИ, Р8-8563, Дубна, 1975.
3. В.А.Альтов, Б.В.Зенкевич, М.Г.Кремнев, В.В.Сячев. Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем. М., Энергия, 1975.
4. М.П.Малков, И.Б.Данилов, А.Г.Зельдович, А.Б.Фрадков. Справочник по физико-техническим основам криогеники. М., Энергия, 1973.
5. Х.Менке, Ю.А.Шишов. Сообщение ОИЯИ, 8-7019, Дубна, 1973.
6. И.Н.Гончаров, А.Никитиу, И.С.Хухарева. Сообщение ОИЯИ, 8-8302, Дубна, 1974.
7. H. Brechna. *Superconducting Magnet Systems*, Springer-Verlag, Berlin, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 марта 1976 года.