

С 393 мс

А - 676

16/II-70

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

8 - 4882



Н.Г. Анищенко, В.А. Васильев, В.Я. Волков,  
А.Г. Зельдович, Н.К. Зельдович, В.В. Крылов,  
Д.В. Приходько, Ю.А. Шишов

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

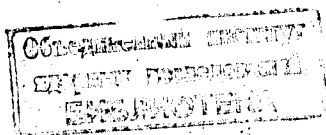
СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА  
С СОЛЕНОИДОМ ВНУТРЕННИМ ДИАМЕТРОМ 35 СМ

1969

Н.Г. Анищенко, В.А. Васильев, В.Я. Волков,  
А.Г. Зельдович, Н.К. Зельдович, В.В. Крылов,  
Д.В. Приходько, Ю.А. Шишов

СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА  
С СОЛЕНОИДОМ ВНУТРЕННИМ ДИАМЕТРОМ 35 СМ

8204/2 пр



В криогенном отделе Лаборатории высоких энергий ОИЯИ изготовлена и испытана сверхпроводящая магнитная система. Основные ее параметры приведены в табл. 1. Система предназначена для отработки конструкции и технологии изготовления крупных соленоидов. Например, таких, как соленоид, входящий в макет криогенной высокочастотной ускорительной секции кольцетрона, имеющий внутренний диаметр 62 см, длину 250 см и напряженность поля  $20 \text{ кгс}^{1/}$ , соленоид многокубовой водородной пузырьковой камеры (внутренний диаметр 5 м, поле около  $40 \text{ кгс}^{2/}$ ). Перечисленные соленоиды являются полностью стабилизированными и имеют обмотку из ленты прямоугольного сечения, свитой в плоские спирали - диски. Сравнительно небольшая индуктивность соленоидов обеспечивается выбором лент с током в несколько килоампер. Таким образом, в описываемом соленоиде моделируется и исследуется конструкция обмотки из мощного ленточного сверхпроводника. Кроме того, изучаются системы обеспечения жидким гелием и системы энергоснабжения и эвакуации запасенной в соленоиде энергии.

Соленоид (рис. 1) состоит из 12 дисков, намотанных из ленты сечением  $2 \times 25 \text{ мм}^2$ . Диски (3) разделены текстолитовыми изоляторами (4) толщиной 5 мм с прорезями, обеспечивающими доступ жидкого гелия к торцам дисков. Нержавеющие фланцы (1) сжимают диски посредством латунных шпилек (2).

Количество сверхпроводника по длине ленты изменяется ступенями по закону, близкому к оптимальному: от 30 проволок на внутренних витках до 10 – на внешних. Ниобий – циркониевый сверхпроводник имеет латунное покрытие, стабилизирующий металл – бескислородная медь.

В конструкции соленоида предусмотрено использование нескольких видов сверхпроводящих лент, отличающихся технологией изготовления. Восемь дисков соленоида навиты из лент, выполненных методом электролитического осаждения меди на медную подложку со сверхпроводящими проволочками.

Первые испытания были проведены на соленоиде, собранном из указанных восьми дисков. Этот соленоид показан на рис. 2. Остальные диски будут добавлены после освоения новых видов технологии изготовления лент.

Лента в каждом диске состоит из двух кусков по 65 м каждый. В месте стыка медь сварена, а сверхпроводящие проволоки, припаянные индием, перекрывают место стыка на длине около полуметра.

Контакт между двумя соседними дисками выполнен пайкой индием двух коротких отрезков ленты с 30 сверхпроводящими проволочками.

Хомуты (5), рис. 1, предотвращают размотку дисков. Два последних витка ленты укладываются в скобу (4), рис. 3, с отверстиями под палец (2) и стягиваются между собой посредством болта (1) и прижимной планки (3). Межвитковой изоляцией (5), рис. 3, служат уложенные вместе лента из стеклоткани и пленка из лавсана.

В одном из дисков лента имеет поперечные канавки для обеспечения лучшего охлаждения гелием, в остальных – ленты омываются жидким гелием только по торцам.

Соленоид подсоединен к внешним токовым шинам с помощью двух охлаждаемых парами гелия вводов, рис. 4.

Набор медных лент шириной от 5 до 25 мм и толщиной по 0,5 мм каждая собираются в цилиндрический пакет (2) длиной 170 см. Выступы на лентах, полученные выдавливаем, обеспечивают зазоры шириной 0,15 мм для прохода гелия. Пакет вставляется в трубу из нержавеющей стали (5) диаметром 27 мм. Верхний конец пакета заливается припоем ПОС-40 в медной головке ввода (1). Для предотвращения обмерзания уплотнения ввода (3) в крышке криостата трубка с пакетом лент имеет вакуумную рубашку (6).

При выборе сечений вводов мы руководствовались задачей получения минимального теплопритока в жидкий гелий при токе 2,5 ка. Теплоприток, рассчитанный по методике /6/, составляет 10 вт, а измеренный теплоприток при токе 1800 а равен ориентировочно 12 вт.

Вводы электрически изолированы от корпуса соленоида, от крышки криостата и подводящих труб обратного потока гелия. Для этой цели использовались текстолитовые и фторопластовые изоляторы. Сопротивление одного ввода в рабочих условиях составляет  $0,3 \cdot 10^{-4}$  ом при токе 1700 а. Отношение сопротивлений.:

$$\frac{R_{300^{\circ}\text{К}}}{R_{4,2^{\circ}\text{К}}} \approx 60.$$

Соленоид помещен в криостат дьюарного типа внутренним диаметром 80 см, высотой около 200 см и емкостью 300 л жидкого гелия. Во время охлаждения и заполнения криостат соединен с помощью двух гибких трубопроводов с ожижителем ГО-1М производительностью 80 литров жидкого гелия в час. Охлаждение ведется ступенями, при последовательном включении ванны ожижителя /3/. Контроль температуры соленоида осуществляется с помощью нескольких термомпар. После заполнения жидким гелием криостат с соленоидом перевозится в лабораторию и подсоединяется к газовым и электрическим коммуникациям. Газовая система (рис. 5) обеспечена устройствами для контроля, регулирования и управления потоками гелия, имеет предохранительный клапан ПК1 на случай резкого вскипания жидкости.

Электрическая схема питания и контроля работы сверхпроводящей магнитной системы представлена на рис. 6; технические характеристики устройств, входящих в схему, приведены в табл. 2.

Источником электропитания системы служит низковольтный генератор постоянного тока. Обмотка возбуждения генератора включена в диагональ "мостика", собранного на реостатах  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{\text{рег } 1}$ ,  $R_{\text{рег } 2}$  и питаемого от селенового выпрямителя СВ /4/. Предусмотрен также специальный реверсивный полупроводниковый источник возбуждения (РПИВ), позволяющий производить ввод тока любой заданной величины со скоростью, изменяемой в широком диапазоне.

Контроль режимов работы источника питания, соленоида и устройств эвакуации энергии осуществляется с помощью двухкоординатных и многоперьевых самопишущих и показывающих приборов, осциллографа и цифрового вольтметра. Напряженность магнитного поля в отверстии соленоида измерялась с помощью 4 датчиков Холла. Предусмотрены потенциальные выводы с каждого диска и контактного соединения для регистрации появления нормальной зоны.

Схема электроснабжения предусматривает следующие режимы эвакуации запасенной энергии во внешние устройства:

а) неаварийная эвакуация энергии (рекуперацией ее в сеть переменного тока) осуществляется переполюсовкой обмотки возбуждения генератора (с помощью, например,  $K_2$  в схеме "мостика" (рис. 6); максимальное расчетное время эвакуации энергии  $W = 0,5$  Мдж при напряжении на генераторе 2 вольта составляет в этом случае 200 секунд;

б) эвакуация на постоянно подключенное к соленоиду активное гасительное сопротивление  $R_{гас.}$ , величина которого может изменяться от 0,05 до 0,2 ома; максимальное начальное напряжение на концах соленоида при эвакуации 0,5 Мдж на  $R_{гас.} = 0,1$  ома составляет 250 в, время эвакуации 6 сек ;

в) эвакуация путем разряда соленоида на дугогасительную решетку автомата гашения поля типа АГП-30-41 происходит при разрыве цепи контактами этого автомата ( $R_{гас.}$  в этом случае отключено); эвакуация происходит при постоянном напряжении 1200 вольт за время 0,2 секунды.

Автомат гашения поля представляет собой однополюсный неполяризованный коммутационный аппарат с дистанционным управлением. Гашение поля осуществляется путем разряда соленоида на электрическую дугу, горящую в кольцевой дугогасительной решетке. Условия эвакуации энергии из соленоида при использовании АГП являются оптимальными, т.е. такими, при которых продолжительность процесса имеет наименьшую возможную величину; гашение поля происходит в этом случае при постоянном напряжении на концах соленоида. Можно принять /5/, что при оптимальных условиях время эвакуации в 5 раз меньше, чем при постоянном активном разрядном сопротивлении (при равенстве в обоих случаях напряжения эвакуации).

Датчиком срыва (ДС на рис. 6) сверхпроводящего состояния соленоида служит устройство, реагирующее на активную составляющую падения напряжения на обмотке. Сигналом от этого датчика можно включать любой по выбору режим эвакуации энергии.

На охлаждение соленоида и заливку криостата жидким гелием понадобилось примерно 24 часа. Скорость охлаждения ограничивалась небольшими проходными сечениями сливных вентилей ожижителя. Выходящий из криостата гелий имел довольно низкую температуру ( $-50^{\circ}\text{C}$  в начале охлаждения), но холод не использовался в ожижителе — газ направлялся в теплый обратный поток. То же самое происходило и при заливке гелия. Таким образом, время на подготовку соленоида к работе можно сократить примерно в 3 раза, если обеспечить более полный теплообмен между соленоидом и газом или использовать холод в ожижителе. Переход с одного режима на другой осуществляется при замедлении скорости охлаждения. Возможно, что экономически выгоднее вести охлаждение с максимальной скоростью, которую позволяет развить рефрижераторная установка. При этом затраты энергии будут далеки от минимальных, но значительно уменьшатся трудозатраты и более интенсивно будет использовано оборудование. Целью первого испытания магнитной системы было выяснение работоспособности ее основных узлов и нахождение критических параметров соленоида. Первый вариант системы предусматривал достижение напряженности поля в 20–30 кГс, для этого соленоид был набран из восьми дисков, причем вес соленоида достигал примерно 600 кг.

Ввод тока осуществлялся как с помощью схемы "мостика", так и с помощью РПИВ, который позволял менять скорость ввода от нуля до 500 а в минуту. Рассеянное магнитное поле соленоида было достаточно велико, чтобы оказать влияние на работу некоторых приборов. Например, при токе 700 а сработало реле защиты соленоида, которое настроено только на появление активного напряжения в соленоиде. Критический ток оказался равным примерно 1,8 ка. Дальнейшее увеличение тока сопровождалось усиленным кипением гелия, хотя соленоид оставался в большей части сверхпроводящим. Слабым местом был один из дисков. Нормальная зона была стабильна и росла только с увеличением тока, что свиде-

тельствует о полной стабильности ленты при токе 1,8 ка. Проведены отключения источника питания при помощи АГП с разрядом запасенной в конденсаторе энергии на внешние активные сопротивления и отдельно на дугогасительную решетку АГП. Также испробована быстрая рекуперация в сеть путем переплюсовки обмотки возбуждения генератора. Во всех трех случаях удалось эвакуировать не более 50% энергии.

В заключение авторы выражают благодарность Н.И. Павлову за постоянную поддержку в работе и сотрудникам криогенного и электротехнического отделов, отдела главного энергетика, экспериментальных мастерских ЛВЭ, ОНМУ и ЦЭМа, внесших значительный вклад в изготовление сверхпроводящей магнитной системы.



## Л и т е р а т у р а

1. Н.Г. Анищенко и др. Криогенная высокочастотная ускорительная секция кольцетрона. Препринт ОИЯИ, Р9-4722, Дубна, 1969.
2. Н.Г. Анищенко и др. Пятиметровая жидководородная пузырьковая камера, ч. II, Криогенные системы и свехпроводящий соленоид. Препринт ОИЯИ, 8-3316, Дубна, 1967.
3. А.Г. Зельдович, Ю.А. Шишов. Криогенные проблемы, связанные с использованием крупных сверхпроводящих соленоидов. Препринт ОИЯИ, Р8-3206, Дубна, 1967.
4. Н.Г. Анищенко, Д.В. Приходько. Источники питания для сверхпроводящих соленоидов криогенного отдела ОИЯИ. ОИЯИ, Б2-13-4689, Дубна, 1969.
5. О.Б. Брон. Автоматы гашения магнитного поля, Госэнергоиздат, 1961.
6. G. der Nigohossian. Optimisation des descentes de courant dans des enceintes cryogeniques. Report CEA-R3167.

Рукопись поступила в издательский отдел

18 декабря 1969 года.

Таблица 1

## Основные параметры сверхпроводящего соленоида

Внутренний диаметр соленоида по обмотке	- 35 см
Внешний диаметр	- 70 см
Высота	- 28-35 см
Вес соленоида	- 600-800 кг
Вес сверхпроводника	- 6,7-10 кг
Индуктивность	- 0,16-0,30 Гн
Напряженность магнитного поля	- 23-40 кГс
Запасенная энергия	- 0,27-0,9 Мдж
Ток в ленте	- 1,8-2,5 ка
Плотность тока в обмотке	- 2400-3300 а/см <sup>2</sup> .

Примечание: меньшие значения параметров относятся к испытанному соленоиду с 8 дисками обмотки, большие - к запроектированному с 12 дисками обмотки.

Таблица 2  
Технические характеристики устройств схемы  
энергоснабжения

Номинальный ток генератора	- 5000/2500 а
Номинальное напряжение генератора	- 6/12 в
Возбуждение генератора - независимое	- 9 а, 80 в
Внешнее активное гасительное сопротивление	- 0,05+0,2 ома
Номинальный ток автоматического воздушного выключателя	- 6000 а
Напряжение на дуге постоянного тока, разрываемой выключателем	- до 750 в
Номинальный ток автомата гашения поля типа АГП-30-41	- 3000 а
Количество последовательно выключенных промежутков дугогасительной решетки АГП	- 40
Максимальное напряжение на дуге в АГП при эвакуации энергии	- 1,500 в
Максимальная энергия, поглощаемая решеткой АГП	- $2,8 \cdot 10^6$ дж
Время включения и отключения (без учета времени и горения дуги) АГП соответственно	- 0,3 и 0,1 сек.

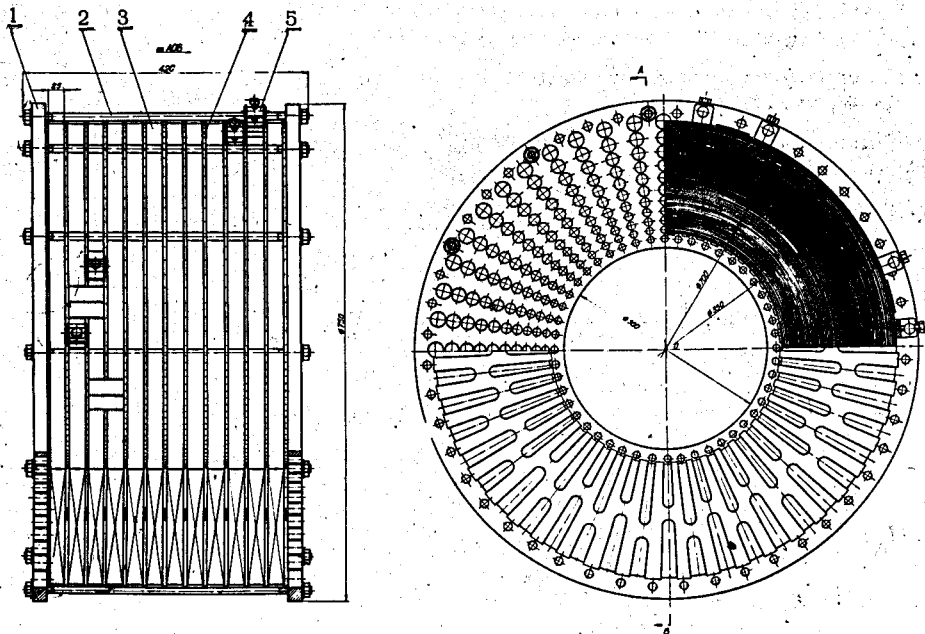


Рис.1. Сверхпроводящий соленоид на 40 кгс.

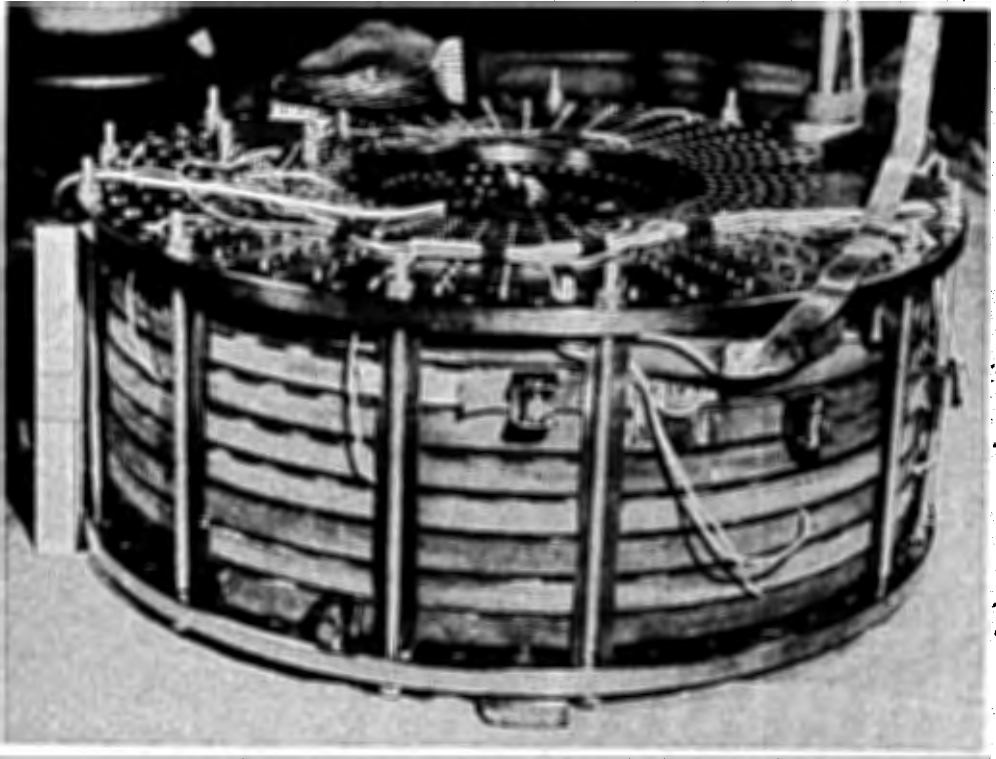


Рис.2. Внешний вид соленоида из 8 дисков на 25 кгс.

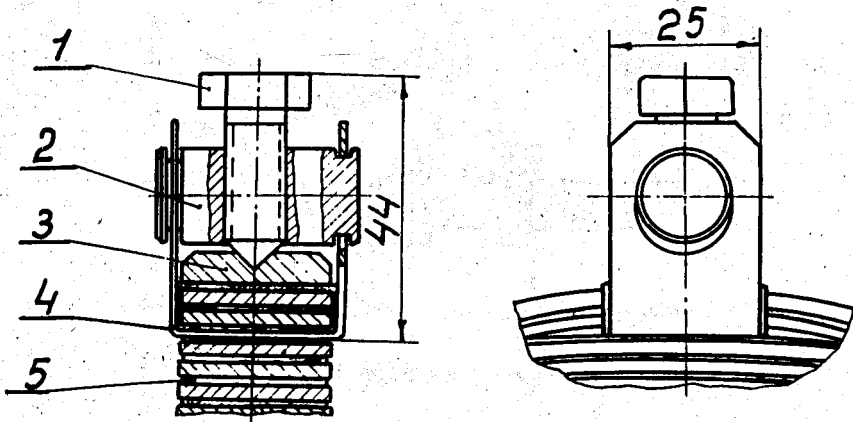


Рис.3. Хомут для крепления шины в диске.

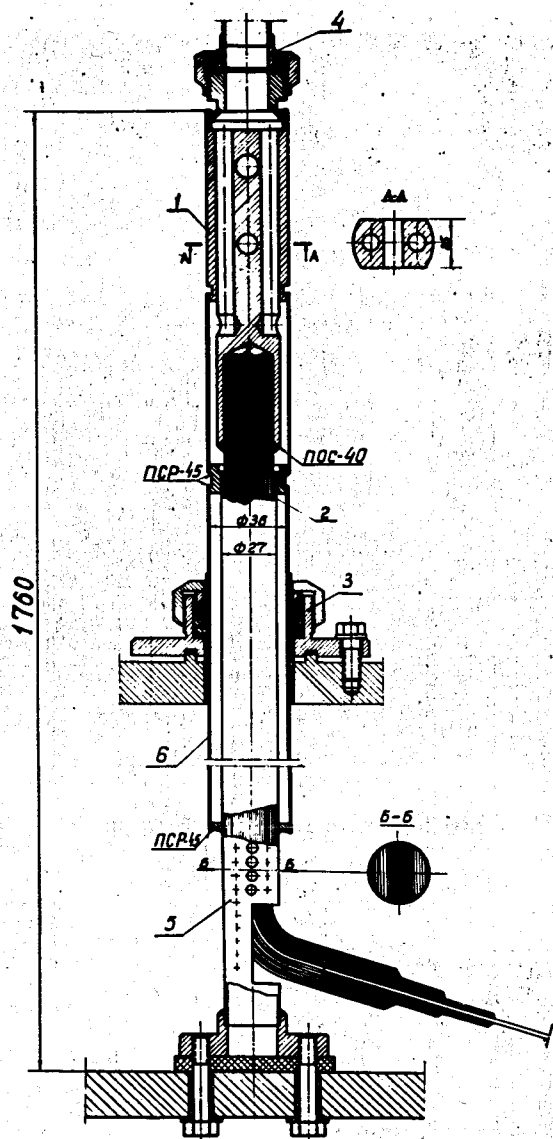


Рис.4. Электрический ввод на 2,5 ка.

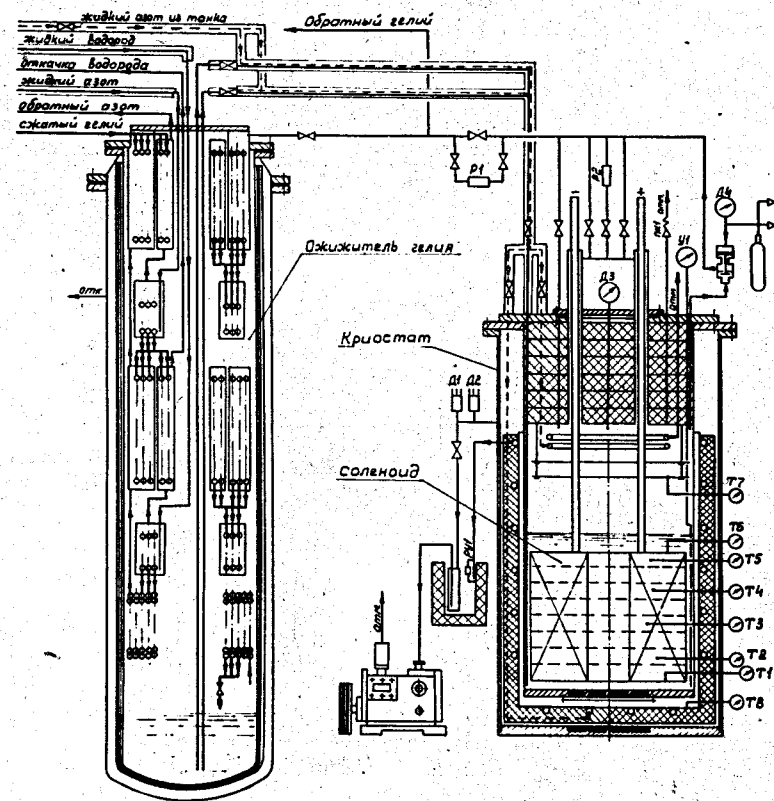


Рис.5. Схема газовых коммуникаций.

