



Соленоид детектора поляризованных частиц SPD NICA из сверхпроводящего кабеля типа Нуклотрон

Г.Г. Ходжибагян, А.А. Котова, Г.Л. Кузнецов, Д.Н.
Никифоров, М.С. Новиков, Е.В. Сергеева

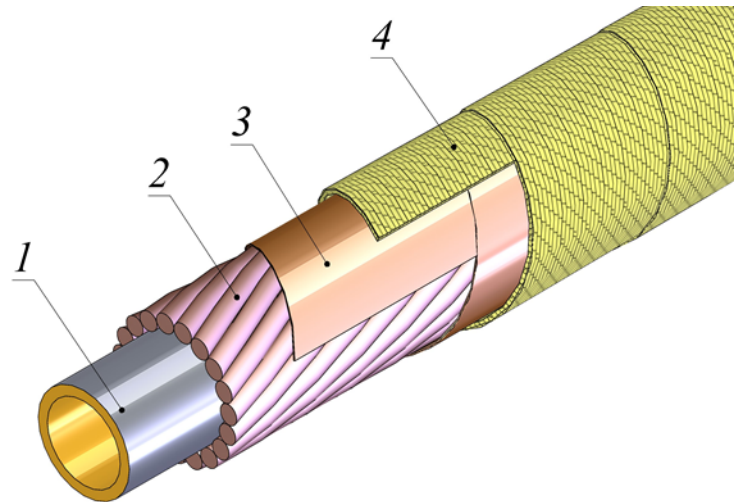
ОИЯИ, Дубна, 25 ноября 2021

Введение

- Магнит установки **SPD** предназначен для создания в его апертуре однородного магнитного поля с номинальной индукцией **1,0 Тл**. Сверхпроводящий соленоид будет окружен железным ярмом, служащим для замыкания магнитного потока и формирования магнитного поля с требуемой однородностью.
- Требования к магниту:
- Максимальное поле на оси соленоида – $B_z \leq 1$ Тл
- Однородность магнитного поля на оси - $dB_z / B_z \leq 0,05$
- Диаметр «теплой» апертуры – **3200 мм**
- Длина соленоида – **3,8 м**

Конструкция соленоида

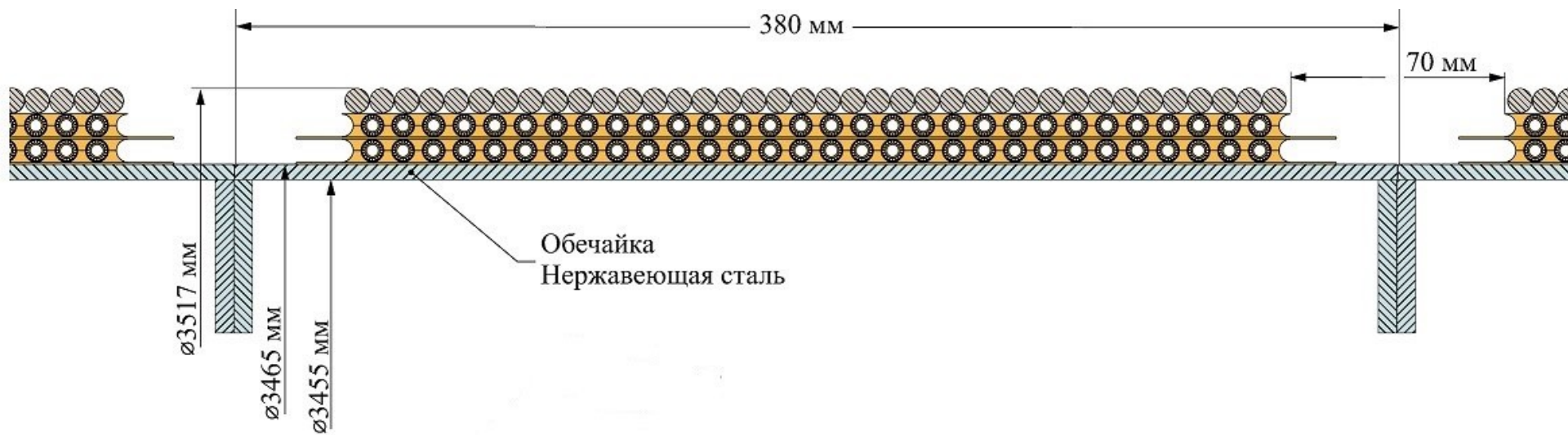
В качестве основы для изготовления соленоида выбрана технология с использованием трубчатого композитного сверхпроводящего кабеля, предложенная в ЛФВЭ и хорошо зарекомендовавшая себя в магнитах синхротрона Нуклотрон. В ЛФВЭ имеется база для производства такого кабеля, требующая лишь модернизации существующего оборудования.



Трубчатый СП кабель соленоида SPD: 1 – трубка с каналом для охлаждения; 2 – сверхпроводящий провод; 3 – лента из полиимида; 4 – стеклолента, пропитанная компаундом горячего отверждения.

Обмотка соленоида

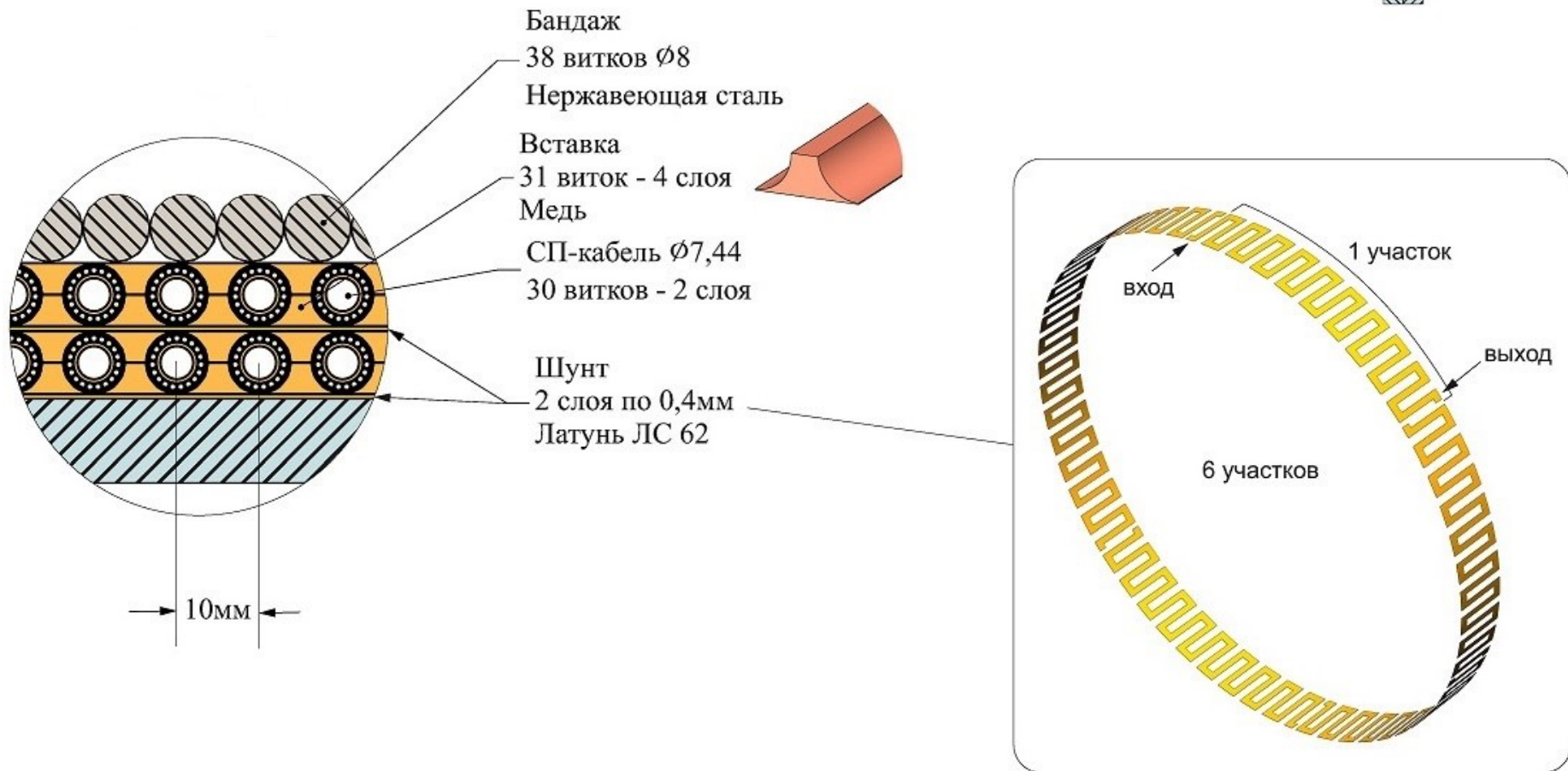
Соленоид со средним радиусом обмотки 1,742 м и длиной 3,8 м должен иметь высокую однородность магнитного поля в апертуре. Двухслойную обмотку планируется изготовить из 10 участков (катушек) по 2 секции в каждой. Секция обмотки длиной 0,38 м насчитывает 30 витков трубчатого сверхпроводящего кабеля.



Изготовление катушек обмотки

Намотка 10 катушек (участков) обмотки осуществляется на оправки из нержавеющей стали. Снизу и сверху каждого слоя катушки укладываются профилированные медные полосы, заполняющие пустоты между витками. Снизу каждого слоя участка обмотки закладываются шунты – нагреватели обмотки, которые необходимы для защиты от перегрева при переходе обмотки из сверхпроводящего в нормальное состояние. Поверх обмотки участка наматывается бандаж из нержавеющей проволоки. После намотки участка из двух секций обмотки катушка подвергается термообработке с целью полимеризации эпоксидного компаунда. Сборка катушек между собой осуществляется на стапеле. При этом механически соединяются между собой оправки отдельных катушек. Затем производится соединение гелиевых охлаждающих коммуникаций соленоида и электрические соединения между секциями обмотки.

Детали обмотки соленоида



Характеристики кабеля обмотки

Кабель

Диаметр охлаждающего канала	м	$4 \cdot 10^{-3}$
Наружный диаметр трубки кабеля	м	$5 \cdot 10^{-3}$
Материал трубки		Cu
Число СП проводов		19
Шаг транспозиции проводов	м	0.1
Наружный диаметр кабеля с изоляцией	м	$7.44 \cdot 10^{-3}$
Площадь сечения по меди	м ²	$15,77 \cdot 10^{-6}$
Площадь сечения по сверхпроводнику	м ²	$3,38 \cdot 10^{-6}$
Отношение Cu/SC		4,66/1
Длина в секции	м	328,3
Общая длина в обмотке	м	6 566

Провод

Диаметр	м	$9.0 \cdot 10^{-4}$
Сверхпроводник		Nb-Ti/Cu
(Nb-Ti) / Cu – объемное отношение		1 / 2,57
Диаметр сверхпроводящей нити	μм	7
Максимальный рабочий ток, I_{\max}	А	270
Критический ток при 2Тл и 4,2К	А	≥ 670
Длина провода в обмотке	м	162 200

Основные характеристики обмотки

Опорный цилиндр		
Внутренний диаметр	м	3,455
Наружный диаметр	м	3,465
Материал	Сталь 12Х18Н10Т	
Обмотка		
Максимальное магнитное поле, B_0	Тл	1,0
Внутренний диаметр	м	3,465
Наружный диаметр	м	3,498
Длина	м	3,8
Число слоев		2
Число секций обмотки		2 * 10
Число витков кабеля		30 x 2 x 10
Максимальный рабочий ток, I_{\max}	А	5067
Индуктивность	Гн	1,144
Запасенная энергия при I_{\max} , E	МДж	14,7



Система охлаждения

Обмотка соленоида охлаждается потоком гелия сверхкритического давления, который прокачивается внутри охлаждающего канала кабеля. Всего насчитывается 20 параллельных охлаждающих каналов. Каждая секция соленоида подключена параллельно к питающему и отводящему гелиевому коллектору. Рабочая температура обмотки – 4,8 К, номинальный расход жидкого гелия через соленоид около 16 г/с. Холодная масса соленоида составляет около 7,9 тонн. Охлаждение соленоида планируется от гелиевого рефрижератора с номинальной холодопроизводительностью 100Вт, который будет установлен в непосредственной близости от SPD.

Система охлаждения

Расчетная тепловая нагрузка

Теплоприток		
Остаточными газами	Вт	7,6
Лучеиспусканием	Вт	6,2
По подвесам	Вт	14,4
По вводам тока	Вт	11,0
Всего	Вт	39,2

Система охлаждения

Холодная масса при 4,8 К

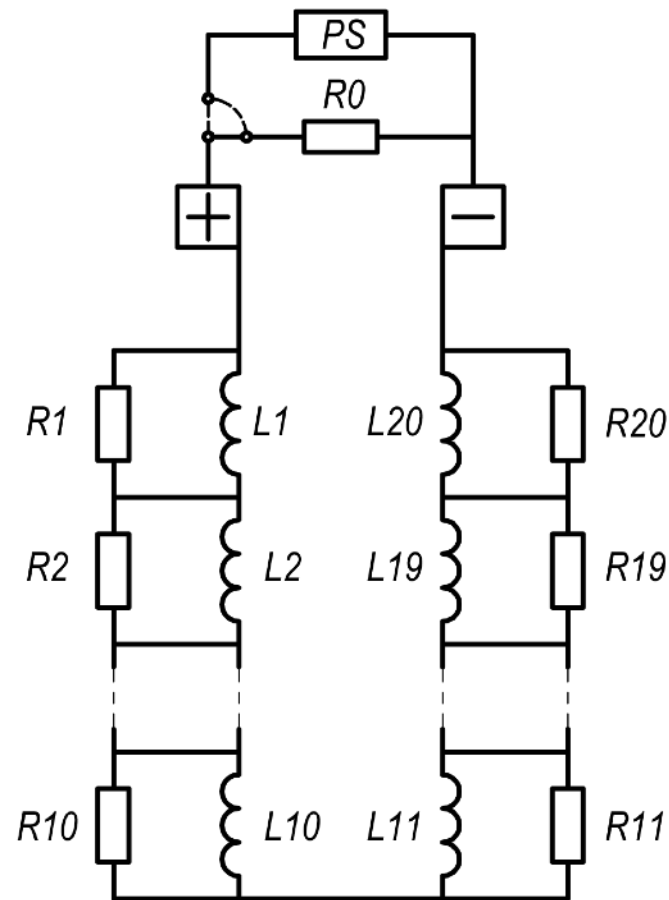
Медь в проводе, M_1	кг	560
Охлаждающая трубка, M_2	кг	413
Медные вставки между витками обмотки, M_3	кг	2 402
Электрические шунты из латуни, M_4	кг	162
Бандаж из нержавеющей проволоки M_5	кг	1670
Внутренняя оправка обмотки, M_6	кг	2 500
Сплав Nb-Ni в проводе, M_7		158
Всего	кг	7 865

Охлаждение

Метод		Принудительная циркуляция <i>He</i>
Рабочая температура	К	4,8
Рабочее давление	МПа	0,3
Тепловая нагрузка при рабочих условиях	Вт	≤ 40
Тепловая нагрузка при заведении энергии	Вт	≤ 74
Номинальный массовый расход гелия	кг/с	$16 \cdot 10^{-3}$
Число параллельных охлаждающих каналов		20
Перепад давления в канале	кПа	≤ 50
Давление в охлаждающем канале	МПа	≤ 3
Время на охлаждение от 300 К до 4,8 К	час	≥ 50

Защита от срыва сверхпроводимости

Защита магнита от перегрева при его переходе из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние решается с помощью секционирования соленоида и равномерного выделения энергии во всей обмотке. Для этого обмотка электрически разделена на 20 секций. Запасенная в магните энергия диссипируется как на внешнем сопротивлении, так и на 20 шунтах – нагревателях, расположенных на внутреннем радиусе каждого слоя обмотки. Внешнее сопротивление $R_0 = 0,04$ Ом ограничивает максимальное напряжение относительно «земли» величиной ± 100 В. Шунты делят обмотку на 20 секций, в каждой из которых параллельно к секции обмотки подсоединен шунт из латунной ленты. Шунт электрически параллельно подсоединен к сверхпроводящему кабелю своей секции и имеет хороший тепловой контакт со сверхпроводящим кабелем по всей его длине, что обеспечивает очень высокую скорость распространения нормальной зоны в обмотке.



Защита от срыва сверхпроводимости

Доля энергии, выделившейся в обмотке, составит около 54 % от запасенной в соленоиде энергии или 7 900 кДж, а постоянная времени процесса диссипации энергии составит около 13 с.

Оценка максимальной температуры нагрева обмотки в результате её перехода в нормальное состояние выполнена при следующих допущениях: выделившаяся в соленоиде энергия диссипирует в сверхпроводящих проводах, медной трубке и медных вставках; скорость распространения нормальной зоны $v = \infty$.

$$\Delta T \approx 0,54 E / (M \cdot C), \text{ K}$$

где: E – запасенная энергия при максимальном токе I_{\max} ;
 $M = M_1 + M_2 + M_3$, где $M_1 = 560$ кг – масса меди в СП проводе, $M_2 = 413,2$ кг – масса медной трубки, $M_3 = 2402$ кг – масса медных вставок;
 $C = 39,31$ Дж/ (кг · К) – значение теплоемкости меди при средней температуре 34,1 К.

$$\Delta T \approx 59,8 \text{ K}, \quad T_{\max} \leq 65 \text{ K}, \quad E / M \approx 4,36 \text{ кДж/кг}$$

Криостат соленоида

Основные характеристики криостата

Длина	М	4,0
<i>Диаметр теплового экрана при 80 К:</i>		
Экран внутри соленоида	М	3,305
Экран вокруг соленоида	М	3,617
<i>Диаметр вакуумного кожуха:</i>		
- кожух из стали 12Х18Н10Т внутри соленоида	М	3,175
- кожух из стали 12Х18Н10Т вокруг соленоида	М	3,767
Число опорных элементов		24
Масса вакуумного кожуха	КГ	15330
Масса тепловых экранов	КГ	1340
Общая масса криостата	КГ	16700

Thank you for your attention