

УДК 621.317.4: 621.3.08

Сверхпроводящие соленоиды для управления поляризацией пучков в коллайдере NICA

А.И. Агеев, Ю.В. Алтухов, И.В. Богданов, С.С. Козуб, Л.М. Ткаченко, В.И. Шувалов
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино
Yuriy.Altukhov@ihep.ru, ageyev@ihep.ru, bogdanov@ihep.ru, kozub@ihep.ru, tlm@ihep.ru,
shuvalov@ihep.ru

В.В. Борисов, Ю.В. Гусаков, С.А. Костромин, Д.Н. Никифоров, Е.М. Сыресин
Объединённый институт ядерных исследований – ОИЯИ, Дубна
borisov@jinr.ru, igoussak@yandex.ru, kostromin@jinr.ru, dmitnik@jinr.ru, esyresin@jinr.ru

Целью статьи является предварительное рассмотрение и обоснование разработки сверхпроводящих соленоидов с магнитными полями 0.5-6 Тл для управления поляризацией пучков в коллайдере NICA. Основными целями экспериментов на коллайдере NICA являются исследования в области сверхплотной горячей барионной материи и спиновой физики. Для формирования поляризованных протонных пучков в кольцах коллайдера NICA планируется установить Сибирские змейки, в состав которых входят четыре блока соленоидов. В статье представлены основные результаты расчетов магнитного поля, параметры оптимизированной геометрии, выбрана предварительная схема защиты соленоида и определены теплопритоки в криостате.

Keywords: коллайдер NICA, поляризованные протонные пучки, Сибирские змейки, сверхпроводящие соленоиды.

Superconducting solenoids for controlling beam polarization in the NICA collider

A.I. Ageyev, Y.V. Altukhov, I.V. Bogdanov, S.S. Kozub, L.M. Tkachenko, V.I. Shuvalov
SIK «Kurchatov Institute» – ИФВЭ, Протвино
Yuriy.Altukhov@ihep.ru, ageyev@ihep.ru, bogdanov@ihep.ru, kozub@ihep.ru, tlm@ihep.ru,
shuvalov@ihep.ru

V.V. Borisov, Y.V. Gusakov, S.A. Kostromin, D.N. Nikiforov, E.M. Syresin
Joint Institute for Nuclear Research
borisov@jinr.ru, igoussak@yandex.ru, kostromin@jinr.ru, dmitnik@jinr.ru, esyresin@jinr.ru

The purpose of the article is a preliminary review and justification for the development of superconducting solenoids with magnetic fields of 0.5-6 T for controlling beam polarization in the NICA collider. The main objectives of the experiments at the NICA collider are research in the field of super dense hot baryonic matter and spin physics. To form polarized proton beams in the rings of the NICA collider, it is planned to install Siberian snakes, which include four blocks solenoids. The article presents the main results of calculations of the magnetic field, the parameters of the optimized geometry, a preliminary protection system of the solenoid is selected and heat flows in the cryostat are determined.

Keywords: NICA collider, polarized proton beams, Siberian snakes, superconducting solenoids.

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс коллайдера NICA [1] находится в стадии сооружения в ОИЯИ. Основными целями экспериментов на коллайдере NICA являются исследования в области сверхплотной горячей барионной материи и спиновой физики. Интенсивность поляризованных встречных пучков с полной энергией в системе центра масс протонов $\sqrt{s}=12-27$ ГэВ и дейтронов $\sqrt{s_{NN}}=4-13.8$ ГэВ обеспечивает в Коллайдере среднюю светимость до $10^{32}\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Для формирования поляризованных протонных пучков в кольцах коллайдера планируется установить Сибирские змейки, в состав которых входят четыре двух-апертурных блока соленоидов, далее - блок соленоидов (рис. 1). Эти змейки обеспечивают так называемый режим спиновой прозрачности.

Требуемый интеграл продольного поля в апертуре одного соленоида составляет $0.5-6$ Тл \cdot м, в зависимости от тока его питания.

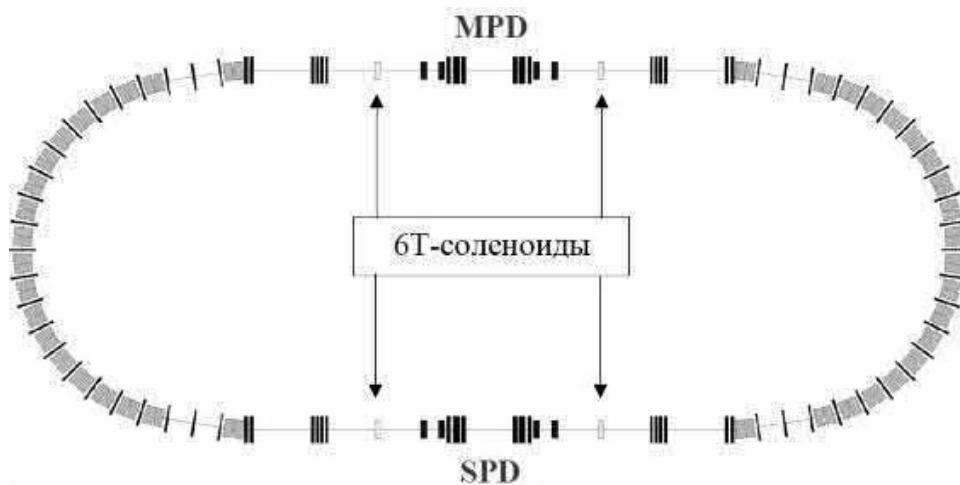


Рис. 1. Схема системы поляризации коллайдера для моды спиновой прозрачности с двумя Сибирскими змейками, включающими в себя четыре блока соленоидов

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИЗДЕЛИЮ И ЕГО СОСТАВ

Целью данной работы является разработка оптимальной модели для последующего создания технического проекта, изготовления и испытания четырех блоков сверхпроводящих (СП) соленоидов с изменяемой в пределах $0.5 - 6$ Тл \cdot м величиной интеграла продольного поля в каждой апертуре. Продольная длина соленоидов 1000 мм, обмотки соленоидов в одном блоке расположены вертикально друг над другом. Расстояние между осями 320 мм. Погрешность совпадения положения осей соленоидов с идеальными замкнутыми орбитами определяется технологией изготовления блока и не превышает 1 мм. Состав блока соленоидов:

- сверхпроводящий соленоид – 2 шт. (Создает продольное движению циркулирующего пучка в коллайдере магнитное поле с дистанционно изменяемой величиной индукции);
- корректирующие сверхпроводящие обмотки – 12 шт. (По 6 шт. на каждый соленоид),

корректирующие дипольные обмотки седловидного типа, намотанные вокруг основной обмотки соленоида (по 2 шт. с каждого края и 2 шт. между ними вдоль всей длины).

Каждый из 4 -х блоков соленоидов работает в составе коллайдера NICA и располагается в соответствующем прямолинейном промежутке коллайдера (рис.1).

Каждый соленоид работает в режиме сверхпроводимости и создает магнитное поле, параллельное направлению идеальной замкнутой орбиты коллайдера в месте расположения блока соленоидов. Величина и направление индукции магнитного поля может изменяться оператором независимо в каждом соленоиде до полного выключения одного из соленоидов в блоке. Режим работы источников питания (ИП) соленоидов и их корректирующих обмоток не зависит от режима работы ИП структурных элементов коллайдера.

Основные требования и технические характеристики блока соленоидов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные технические характеристики блока соленоидов

Параметр	Значение
Масса блока	Определяется расчетом
Количество соленоидов в блоке	2
Апертура соленоида	Холодная
Габаритные размеры блока	Исходя из конструкции
Общая длина криостата вдоль орбиты пучка	Не более 1.5 м
Расстояние между осями соленоидов в блоке по вертикали в охлажденном состоянии	320 мм
Диапазон изменения интеграла магнитного поля	0.5÷6.0 Тл×м
Точность регулировки (выставления) магнитного поля	0.015 Тл
Максимальная скорость изменения поля	0.017 Тл/с
Тип магнитного экрана	Пассивный
Магнитное поле на расстоянии 1.5 м от центра соленоида в радиальном направлении	Не более 0.02 Тл
Продольный размер СП-обмотки соленоида	1000 мм
Внутренний диаметр ионопровода	100 мм
Рабочий ток	300÷2000 А

МАТЕРИАЛЫ

Токонесущий элемент

Сверхпроводящий провод

Для выбора оптимальной геометрии соленоида рассмотрены сверхпроводящие провода

диаметром 0.3 мм [2] и 0.85 мм [3,4], из которых будет транспонирован плоский кабель. Основные их характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Основные характеристики сверхпроводящего провода

Диаметр провода, мм:	0.85	0.3
Количество NbTi волокон в проводе	8910	150
Диаметр NbTi волокон, мкм:	6	15
Шаг скрутки волокон, мм	10	25
Коэффициент заполнения по NbTi	0.42	0.40
Остаточное сопротивление медной матрицы (RRR)	≥70	≥70
Критическая плотность транспортного тока, J_0 , A/м ² [4]	1.5×10^{10}	1.4×10^{10}
Критический ток ($B = 5$ Тл, $T = 4.2$ К), А	≥550	≥50

Сверхпроводящий кабель

Две геометрии кабеля рассмотрены для сверхпроводящего соленоида, одна из которых

рассчитана на рабочий ток 0.3 кА, а вторая – на 2 кА. Далее эти соленоиды будут называться Соленоид 0.3 и Соленоид 2. Основные характеристики кабелей представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Основные характеристики сверхпроводящего кабеля

Тип магнита	Соленоид 0.3	Соленоид 2
Диаметр проволоки, мм	0.3	0.85
Диаметр NbTi волокон, мкм	15	6
Шаг твистирования, мм	25	8-10
Число проволок	28	10
Поперечные размеры без изоляции, мм ²	5.18×0.45	4.64×1.44
Толщина изоляции, мм	0.09	0.09
Поперечные размеры с изоляцией, мм ²	5.36×0.63	4.82×1.62
Угол транспонирования, град.	15	15
Удельное электрическое сопротивление матрицы, ρ _e , Ом×м	5×10 ⁻¹⁰	5×10 ⁻¹⁰

Для расчета потерь выбрано оксидное покрытие сверхпроводящих проводов, позволяющее подавить кабельные потери от вихревых токов [5]. Эффективные поперечное и продольное сопротивления для него равны 84 мОм.

Тепловыделения в сверхпроводящем кабеле

Тепловые потери в сверхпроводящем кабеле состоят из трех составляющих [6] и описываются следующими формулами за треугольный цикл 0-B_{max}-0 в размерности (Дж/м³):

1. **Гистерезисные потери** в единице объема провода, W_h, равны интегралу потерь мощности за цикл. Они имеют простую логарифмическую зависимость от магнитного поля В:

$$W_h = \frac{4}{3\pi} \lambda_s d_f J_0 B_0 \ln \left(1 + \frac{B_{\max}}{B_0} \right) \quad (1)$$

где λ_s - коэффициент заполнения сверхпроводящей нити, d_f – ее диаметр, J₀ и В₀ - параметры, описывающие реальную зависимость критической плотности транспортного тока J_c(В), которая обычно аппроксимируется выражением:

$$J_c = \frac{J_0 B_0}{B + B_0} \quad (2)$$

где J₀ – критическая плотность тока при В=0, В₀ соответствует полю, когда J₀ уменьшается в 2 раза. Таким образом, критическая плотность тока J_c имеет обратно пропорциональную зависимость от магнитного поля В.

Формулы (1) и (2) показывают, что существует только один параметр d_f, который оказывает влияние на потери при сохранении высокой токовой способности провода.

2. **Матричные потери** W_m при скорости изменения магнитного поля \dot{B} и постоянном эффективном матричном сопротивлении ρ_e равны

$$W_m = \frac{1}{2\pi^2} \frac{l_p^2}{\rho_e} \dot{B} B_{\max}, \quad (3)$$

где l_p – шаг скрутки сверхпроводящей нити. Матричные потери имеют квадратичную зависимость от шага скручивания l_p и обратно пропорциональны поперечному сопротивлению ρ_e. Оба эти параметра могут быть использованы для уменьшения матричных потерь.

3. **Кабельные потери** W_c вызваны вихревыми токами в кабеле и зависят от шага транспонирования провода ρ; отношения α ширины/толщине (a/b) кабеля и эффективными поперечным ρ_⊥ и продольным ρ_∥ сопротивлениями между проводами в кабеле:

$$W_c = \frac{\rho^2}{16} \left(\frac{16}{15} \frac{\alpha^2 \dot{B}_\perp B_{\perp \max}}{\rho_\perp} + \frac{2}{3} \frac{\dot{B}_\perp B_{\perp \max}}{\rho_\perp} + \frac{1}{2} \frac{\dot{B}_\parallel B_{\parallel \max}}{\alpha^2 \rho_\parallel} \right) \quad (4)$$

где В_⊥ и В_∥ - поперечная и параллельная широкой стороне кабеля компоненты магнитного поля

Формула (4) показывает, что можно использовать следующие параметры для снижения потерь кабеля: повышение эффективного поперечного сопротивления ρ_{\perp} ; уменьшение коэффициента α ; уменьшение длины транспонирования p .

**РАСЧЕТ СОЛЕНОИДОВ НА ТОК
300 И 2000 А**

Далее все магнитные характеристики будут подсчитаны с помощью программы MULTIC [7]. Поперечное сечение соленоида показано на рис. 2. Оно подобно для вариантов соленоидов 0.3 и 2.

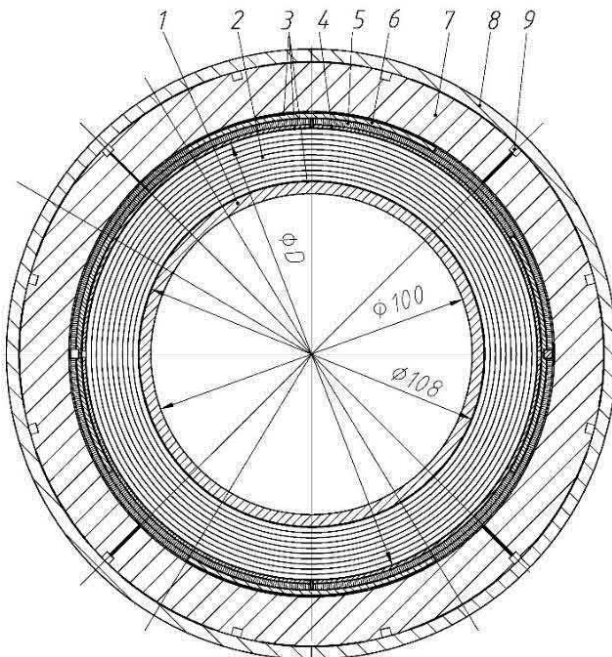


Рис. 2. Поперечное сечение соленоида: 1 – внутренняя труба гелиевого сосуда, 2 – СП обмотка соленоида, 3 – полиимидная электрическая изоляция, 4 – защитная нержавеющая прокладка, 5, 6 – корректирующие дипольные магниты, 7 – магнитопровод, 8 – обечайка гелиевого сосуда, 9 – каналы для двухфазного гелия, охлаждающего обмотку

Магнитное поле и тепловыделения в соленоиде 0.3

Нагрузочная кривая для соленоида 0.3 показана на рис. 3, откуда видно, что запас по току равен 71%.

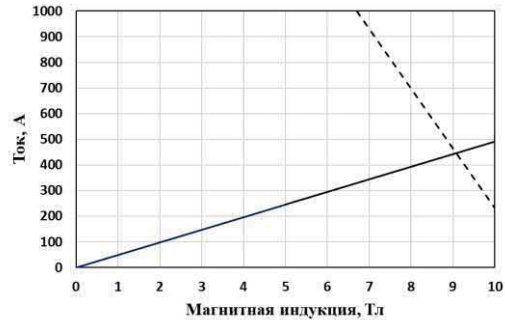


Рис. 3. Зависимость центрального магнитного поля соленоида от тока (сплошная линия) и критического тока короткого образца кабеля из СП провода диаметром 0.3 мм (штриховая линия) от магнитного поля

Распределение магнитного поля по виткам соленоида 0.3 представлено на рис. 4, а распределение мощности потерь – на рис. 5. Здесь для наглядности обмотка разбита в радиальном направлении на 11 секторов по 8 слоев каждый. Следует заметить, что полные потери в основном состоят из гистерезисных потерь, кабельные и матричные потери незначительны (табл.5). Суммарная мощность потерь в обмотке равна 3.63 Вт.

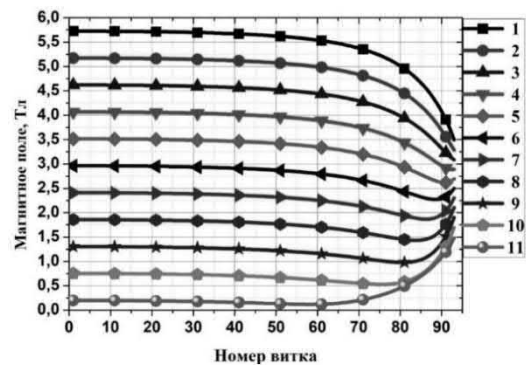


Рис. 4. Распределение модуля магнитного поля по виткам обмотки, разбитой в радиальном направлении на 11 секторов, каждый из которых состоит из восьми слоев

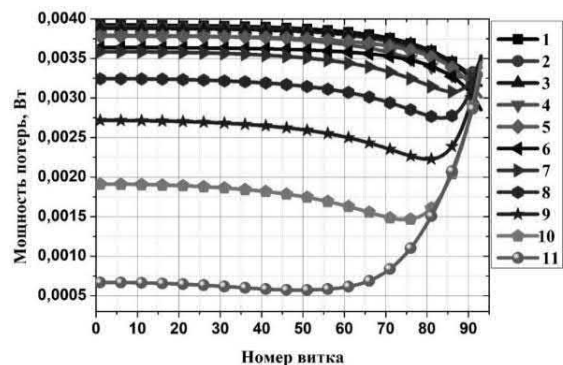


Рис. 5. Мощность тепловыделений в витках 11 секторов сверхпроводящей обмотки

Магнитное поле и тепловыделения в соленоиде 2

Нагрузочная кривая для соленоида 2 показана на рис. 6, откуда видно, что запас по току равен 29%.

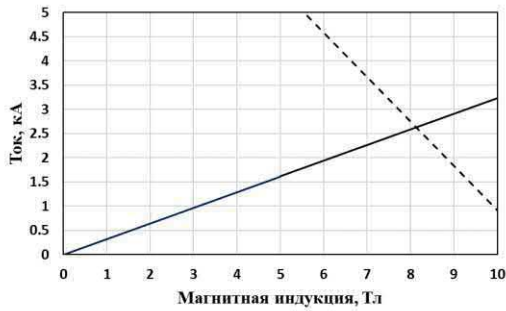


Рис. 6. Зависимость центрального магнитного поля соленоида от тока (сплошная линия) и критического тока короткого образца кабеля из СП провода диаметром 0.85 мм (штриховая линия) от магнитного поля

Распределение компонентов магнитного поля по виткам представлено на рис. 7, рис. 8 и рис. 9, а распределение мощности потерь – на рис. 10. Суммарная мощность потерь в обмотке равна 0.33 Вт.

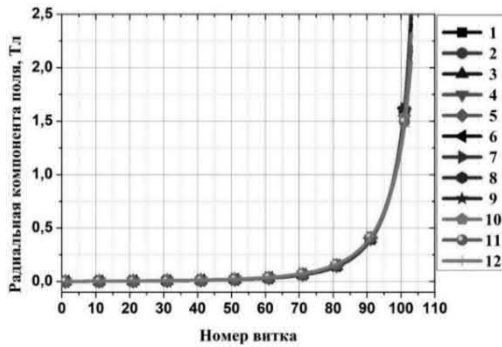


Рис. 7. Распределение радиальной компоненты магнитного поля по виткам для каждого слоя обмотки

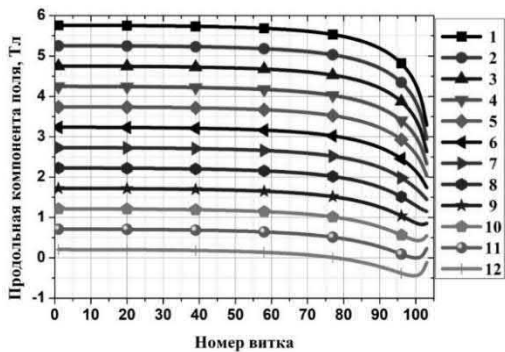


Рис. 8. Распределение продольной компоненты магнитного поля по виткам для каждого слоя обмотки

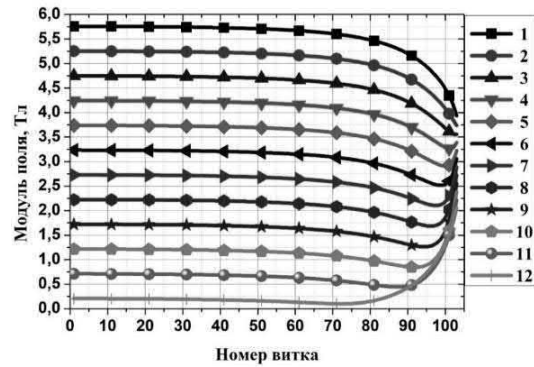


Рис. 9. Распределение модуля магнитного поля по виткам для каждого слоя обмотки

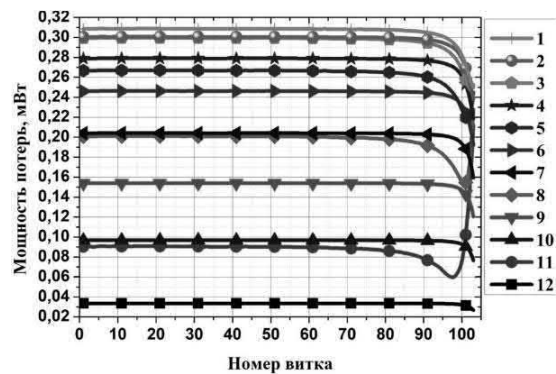


Рис. 10. Мощность тепловыделений по виткам для каждого слоя обмотки

Проведенные расчеты показывают, что мощность тепловыделений 0.33 Вт в обмотке соленоида 2 на порядок величины ниже, чем 3.63 Вт в обмотке соленоида 0.3 за счет меньшего диаметра сверхпроводящих волокон в проводе диаметром 0.85 мм по сравнению с проводом 0.3 мм (таблица 4), а также меньшего примерно в 3 раза количества сверхпроводника в обмотке соленоида 2.

Основные параметры двух геометрий соленоидов представлены в таблице 4. Из технологических соображений внутренний диаметр обмотки выбран равным 108 мм.

Таблица 4.

Основные параметры двух геометрий соленоидов на рабочий ток 0.3 и 2 Ка

Параметр	Соленоид 0.3	Соленоид 2
Диаметр апертуры, мм	100	100
Внутренний диаметр обмотки, мм	108	108
Наружный диаметр обмотки D, мм	218.88	146.88
Радиальная толщина обмотки, мм	55.44	19.44
Число слоев обмотки	88	12
Число витков в слое	186	206
Общее число витков в обмотке	16368	2472
Продольная длина обмотки, мм	996.96	992.92
Диаметр провода, мм	0.3	0.85
Число проволок в кабеле	28	10
Размер кабеля в изоляции, мм ²	5.36×0.63	4.82×1.62
Рабочий ток, А	294.84	1936.21
Ток в проволоке, А	10.53	193.6
Максимальное поле в обмотке, Тл	6.0014	6.0012
Критическая температура, К	6.2	5.8
Запасенная энергия, кДж	230	183
Индуктивность, Гн	5.29	0.098
Гистерезисные потери, Дж	4350.8	388.9
Матричные потери, Дж	4.9	0.9
Кабельные потери, 10 ⁻⁶ , Дж	4.2	0.2
Суммарные потери, Дж	4355.7	389.8
Суммарная мощность потерь, Вт	3.63	0.33
Радиальная сила/град/мм, Н	1.228	1.244
Продольная сила/град, Н	-13.8	-6.2

МАГНИТОПРОВОД

Магнитопровод блока соленоидов предполагается изготовить из стали 20, магнитный момент насыщения которой равен 2.19 Тл. Зависимость магнитной проницаемости от магнитной индукции представлена на рис. 11. Измеренная величина коэрцитивной силы стали 20 равна 286 А/м. Толщина неламинированной пластины 20 мм.

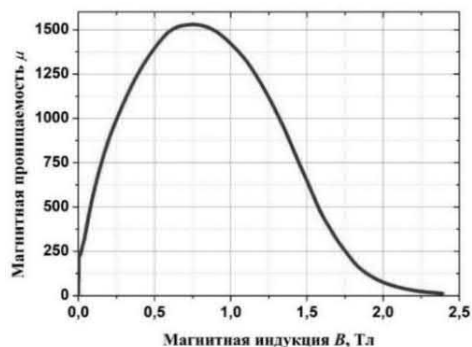


Рис. 11. Зависимость магнитной проницаемости от магнитной индукции для стали 20

Формулы расчета потерь в магнитопроводе

Переменное магнитное поле генерирует тепловые потери в магнитопроводе, состоящие из гистерезисной и вихревой составляющих. Гистерезисные потери на единицу объема железа за цикл можно рассчитать по следующей формуле [8]:

$$W_h = aB_{\max}^b (B_{\max} - B_{\min}), \quad (5)$$

где B_{\max} и B_{\min} - максимальные и минимальные поля в элементах магнитопровода. Коэффициенты a и b определяются свойствами материала.

Потери на вихревые токи за цикл в единичном объеме железного ламинированного листа толщиной d и удельным сопротивлением ρ выражаются величиной [9]:

$$W_c = \frac{1}{6\rho} d^2 B_{\max} \dot{B}, \quad (6)$$

где \dot{B} - скорость изменения магнитного поля.

Расчетные потери в магнитопроводе

Гистерезисные потери и мощности потерь представлены в таблице 5 для двух толщин магнитопровода. Для оценки величины этих потерь использованы исходные данные для стали М250-50 ($H_c = 30$ А/м), где экспериментально измеренные коэффициенты из формулы (6) равны: $a = 4.476$, $b = 2.757$ [8]. Для уточнения величины этих потерь необходимо провести измерения гистерезисных потерь в стали 20.

Мощность вихревых потерь в магнитопроводе для соленоида 0.3 равна 2×10^{-5} Вт, для соленоида 2 составляет 1×10^{-5} Вт

Таблица 5

Гистерезисные потери и мощности потерь для двух толщин магнитопровода

Соленоид	0.3	2
Толщина магнитопровода 15 мм		
Потери, Дж	117.9	84.8
Мощность потерь, Вт	0.33	0.14
Толщина магнитопровода 25 мм		
Потери, Дж	198.1	140.1
Мощность потерь, Вт	0.56	0.24

ЗАВИСИМОСТЬ РАССЕЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ОТ ТОЛЩИНЫ

Магнитопровода

Рассеянные поля рассмотрим для соленоида 2, для соленоида 0.3 результат будет аналогичный. Зависимость модуля магнитного поля в центральном сечении от радиуса для разных толщин магнитопровода представлена на рис. 12, откуда видно, что толщину магнитопровода можно выбирать минимальной. Магнитное поле на расстоянии 1.5 м от центра соленоида в радиальном направлении для всех толщин магнитопровода не превышает 0.002 Тл, что на порядок меньше допустимого значения. Из технологических соображений предварительная толщина магнитопровода выбрана 15 мм.

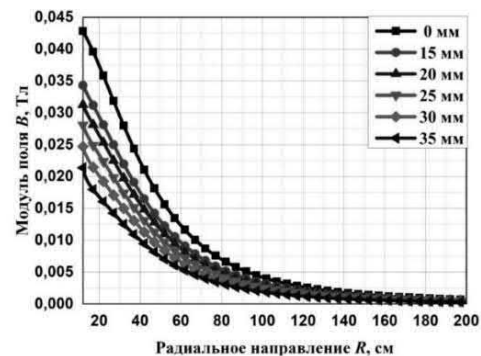


Рис. 12. Зависимость модуля магнитного поля в центральном сечении от радиуса для разных толщин магнитопровода

Для уменьшения продольных рассеянных полей рассмотрим торцевые крышки из стали СТ20 для соленоида 2.0. рис. 13 представляет это распределение для разных толщин крышек при толщине магнитопровода 15 мм. Как видно, толщина крышки не влияет на распределение продольного магнитного поля. Окончательный расчет магнитопровода будет сделан с учетом корректирующих магнитов.

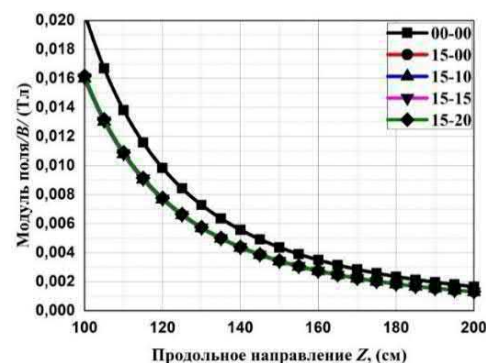


Рис. 13. Продольное распределение поля для разных толщин торцевых крышек; первые две цифры обозначают толщину магнитопровода, остальные две – толщину крышки.

Продольное распределение осевого модуля поля представлено на рис. 14 для двух толщин магнитопровода. Как видно из рисунка, толщина магнитопровода не влияет на распределение магнитного поля. Распределение продольного осевого поля аналогично для соленоидов 0.3 и 2.

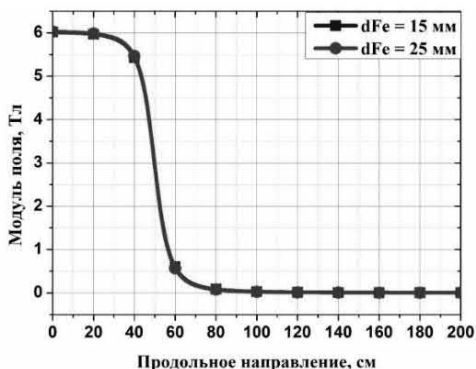


Рис. 14. Продольное распределение осевого модуля поля соленоидов 0.3 и 2

СХЕМА ЗАЩИТЫ И РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Из таблицы 5 видно, что запасенная энергия в соленоиде достаточно велика. Поэтому необходимо предпринимать определенные защитные действия. Такими действиями являются: своевременное обнаружение факта перехода обмотки в нормальное состояние, отключение источника тока и вывод запасенной в соленоиде энергии на внешнее (находящееся вне криостата) сопротивление вывода. Схематически концепцию защиты магнита можно представить следующим образом (рис. 15).

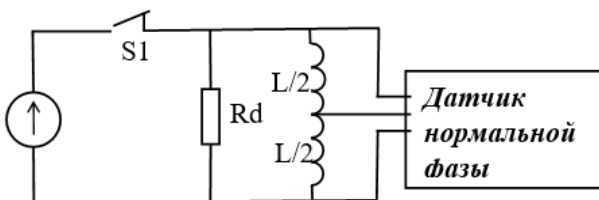


Рис. 15. Схема, поясняющая принцип защиты сверхпроводящей обмотки

После обнаружения датчиком нормальной фазы перехода сверхпроводящей обмотки в нормальное состояние размыкается ключ $S1$, при этом ток, протекающий через обмотку, будет протекать через внешний резистор вывода Rd , и запасенная в магните энергия будет рассеиваться на этом резисторе. При этом электрическое напряжение на обмотке не должно превышать 1000 В, результирующая температура разогрева обмотки должна быть меньше 300 К [10].

При расчете максимальной температуры разогрева обмотки при ее переходе в нормальное состояние были сделаны следующие предположения:

1. Параллельно сверхпроводящему соленоиду постоянно подключен резистор Rd , на который в случае перехода в нормальное состояние будет выводиться энергия, запасенная в обмотке соленоида. Номинал резистора Rd выбран так, чтобы электрическое напряжение при выводе было в пределах 700 – 800 В. Переход обмотки в нормальное состояние обнаруживается датчиком нормальной фазы мостового типа. Для определенности заданы следующие характеристики датчика нормальной фазы: пороговое напряжение срабатывания датчика нормальной фазы $U_{th} = 60$ мВ, а время срабатывания датчика нормальной фазы (время подтверждения, после которого датчик нормальной фазы выдает сигнал о переходе обмотки в нормальное состояние, что служит командой для исполнительных устройств, в частности ключа $S1$ $t_{val} = 20$ мс.

2. При расчете времени достижения напряжением на нормальной зоне величины порогового напряжения срабатывания датчика нормальной фазы t_{th} рассматривался худший случай из возможных, когда нормальная зона возникает на самом краю внутреннего витка обмотки и распространяется в одну сторону. При этом скорость распространения нормальной фазы определялась на основе данных, представленных в [10]. Односторонний разбег нормальной фазы приводит к большему времени, требуемому для достижения порогового напряжения срабатывания датчика нормальной фазы, а стало быть, и к большей температуре разогрева точки, в которой произошел переход. Это дает максимальную оценку температуры разогрева.

3. После обнаружения нормальной фазы происходит отключение источника тока от сверхпроводящего соленоида с помощью ключа $S1$. Рассмотрены два варианта ключа. При использовании электронного ключа (тиристорного или IGBT) токовая цепь разрывается быстро. Для этого случая время отключения (разрыва токовой цепи) t_{val} условно принято равным 1 мс. Для случая использования относительно медленного механического ключа время срабатывания t_{s1} условно принято равным 200 мс. Таким образом, считая от момента зарождения нормальной фазы в сверхпроводнике, вывод запасенной в соленоиде энергии начинается спустя время $t = t_{th} + t_{val} + t_{s1}$.

4. При размыкании ключа $S1$ ток экспоненциально затухает на резисторе вывода. В данных расчетах рассеяние энергии на нормальной фазе не учитывалось, т.е. предполагается,

что вся запасенная энергии выделится только на резисторе R_d . Это дает максимальную величину температуры разогрева точки, в которой произошел переход сверхпроводника в нормальное состояние.

Соленоид 0.3

Для оценки максимальной температуры разогрева сверхпроводника использованы следующие входные параметры:

- $I = 294,84$ А (рабочий ток),
- $Q = 230$ кДж (запасенная энергия),
- $L = 2,59$ Гн (индуктивность соленоида),
- $R_d = 2,5$ Ом (величина резистора вывода),
- $U_{th} = 60$ мВ (пороговое напряжение датчика нормальной фазы),
- $t_{val} = 20$ мс (время подтверждения датчика нормальной фазы).

В этом случае максимальное напряжение на обмотке при выводе запасенной энергии на резистор будет составлять около 740 В.

Максимальная температура точки обмотки, в которой возникла нормальная зона, достигнет 85 К, если время срабатывания ключа t_{s1} будет составлять 1 мс (рис. 16).

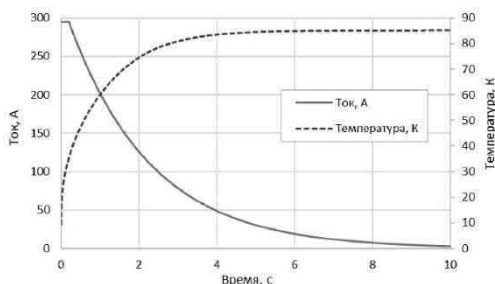


Рис. 16. Временная зависимость тока и температуры точки обмотки, в которой возникла нормальная зона в соленоиде 0.3 при $t_{s1} = 1$ мс

При времени срабатывания ключа t_{s1} , равном 200 мс, максимальная температура обмотки соленоида 0.3, в которой возникла нормальная зона, составит 99 К (рис. 17).

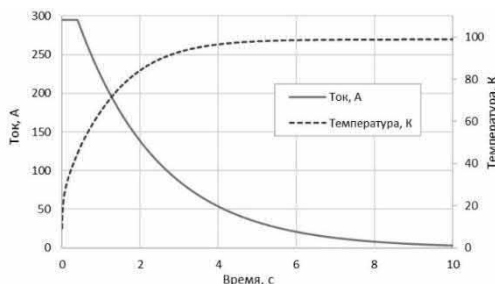


Рис. 17. Временная зависимость тока и температуры точки обмотки, в которой возникла нормальная зона в соленоиде 0.3 при $t_{s1} = 200$ мс

Соленоид 2

Для оценки максимальной температуры разогрева сверхпроводника использованы следующие входные параметры:

- $I = 1936.21$ А (рабочий ток),
- $Q = 183$ кДж (запасенная энергия),
- $L = 0.098$ Гн (индуктивность соленоида),
- $R_d = 0.4$ Ом (величина резистора вывода),
- $U_{th} = 60$ мВ (пороговое напряжение датчика нормальной фазы),
- $t_{val} = 20$ мс (время подтверждения датчика нормальной фазы).

В этом случае максимальное напряжение на обмотке при выводе запасенной энергии на резистор будет составлять 774 В. Максимальная температура точки обмотки, в которой возникла нормальная зона, не превысит 66 К, если время срабатывания ключа t_{s1} будет составлять 1 мс (рис. 18).

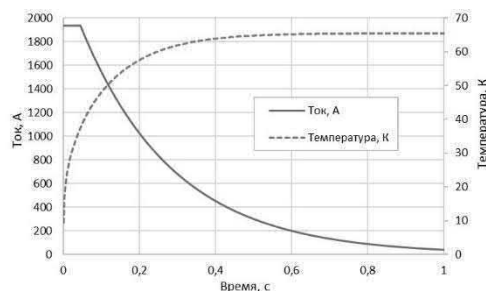


Рис. 18. Временная зависимость тока и температуры точки обмотки, в которой возникла нормальная зона в соленоиде 2 при $t_{s1} = 1$ мс

При времени срабатывания ключа t_{s1} , равном 200 мс, максимальная температура точки обмотки, в которой возникла нормальная зона, не превысит 144 К (рис. 19).

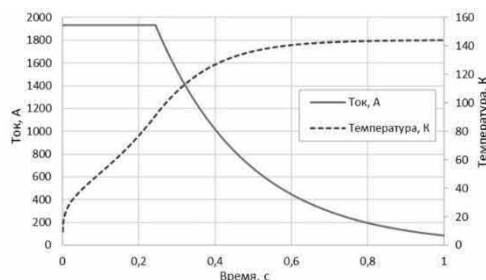


Рис. 19. Временная зависимость тока и температуры точки обмотки, в которой возникла нормальная зона в соленоиде 2 при $t_{s1} = 200$ мс

Основные параметры соленоидов и элементов защиты, наряду с результатами оценки максимальной температуры разогрева точки, в которой произошло зарождение нормальной фазы, приведены в таблице 6.

Таблица 6.

Основные параметры соленоидов, элементов защиты и максимальная температура точки обмотки, в которой возникла нормальная зона, при переходе соленоидов в нормальное состояние

Параметр	Соленоид 0.3		Соленоид 2	
Диаметр провода, мм	0.3		0.85	
Число проволок в кабеле	28		10	
Рабочий ток, А	294.84		1936.21	
Максимальное поле в обмотке, Тл	6.0014		6.0012	
Запасенная энергия, кДж	230		183	
Индуктивность, Гн	5.29		0.098	
Сопротивление вывода Rd, Ом	2.5		0.4	
Максимальное напряжение на сопротивлении вывода Rd, В	737		774	
Пороговое напряжение срабатывания датчика нормальной фазы, мВ	60		60	
Временная задержка срабатывания датчика нормальной фазы, мс	20		20	
Время срабатывания ключа S1, мс	1	200	1	200
Максимальная температура горячей точки обмотки, К	85.1	98.9	65.5	144.0

Даже с учетом предположений, которые дают несколько завышенную оценку температуры разогрева горячего пятна при переходе обмотки в нормальное состояние, видно, что все представленные варианты работоспособны с точки зрения защиты сверхпроводящей обмотки и обеспечивают приемлемую температуру разогрева при приемлемом электрическом напряжении.

РАСЧЕТ НАГРЕВА ОБМОТОК СОЛЕНОИДОВ

Тепловыделения в процессе изменения тока сверхпроводящего соленоида, представленные на рис. 5 и рис. 10, вызывают нагрев его обмотки. Расчет нагрева обмотки сверхпроводящего соленоида проводился с помощью программного комплекса ANSYS [11]. На рис. 20 представлен первый квадрант 2D конечно-элементной модели сверхпроводящего соленоида 2, для соленоида 0.3 модель аналогична. На наружной поверхности магнитопровода имеется двенадцать каналов квадратного сечения со стороной 3 мм для двухфазного гелия, охлаждающего обмотку. В каналах охлаждения задавался коэффициент теплоотдачи $\alpha = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при температуре жидкости 4.7 К. Расчет нагрева обмоток сверхпроводящих соленоидов производился в центральной части обмотки.

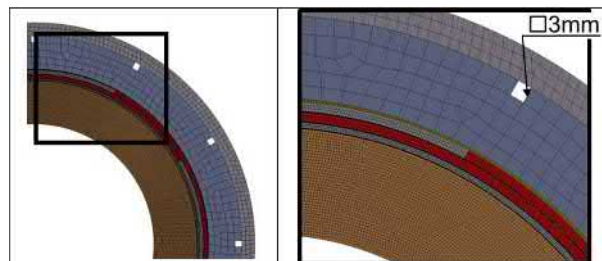


Рис. 20. Первый квадрант конечно-элементной модели СП соленоида 2

В таблице 7 приведены толщины и теплопроводности материалов, используемых в расчете соленоида 0.3 и соленоида 2. Теплопроводность обмотки соленоида в радиальном направлении определяется теплопроводностью кабеля в направлении, перпендикулярном его широкой поверхности. В этом случае теплопроводность изолированного сверхпроводящего кабеля (обмотки соленоида в радиальном направлении) можно определить по формуле:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^m \delta_i}{\sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (7)$$

где δ_i - толщина слоя материала в кабеле;
 λ_i - теплопроводность материала слоя;
 i - номер слоя.

Теплопроводность сверхпроводящего кабеля при 4.7 К составляет 500 Вт/(м·К) [12]. Теплопроводность полиимида рассчитывалась по формуле [13]

$$\lambda_n = 4.638 \times 10^{-3} \times T^{0.5678}, \quad (8)$$

где T - температура в градусах Кельвина

Материал магнитопровода сталь 20 (примеси до 2%), коэффициент теплопроводности

которой при 293 К составляет 52 Вт/(м·К) [14]. Поскольку свойств этой стали при 5 К найти не удалось, в расчетах использованы свойства стали Армко (примеси до 0.16%), коэффициент теплопроводности которой при 293 К составляет 73.7 Вт/(м·К), при 6 К равен 19.6 Вт/(м·К) [15]. С учетом экстраполяции и разницы теплопроводности при комнатной температуре стали 20 и Армко коэффициент теплопроводности стали 20 при 4.7 К принят 5 Вт/(м·К).

Таблица 7.

Свойства материалов расчетной модели.

Слой (материал)	Толщина, мм		Теплопроводность, Вт/(м·К)
	соленоид 0.3	соленоид 2	
Толщина СП кабеля без изоляции	0.45	1.44	
Изоляция СП кабеля	0.18	0.18	0.011
Обмотка соленоида	55.44	19.44	0.0385 (соленоид 0.3) 0.099 (соленоид 2)
Защитная прокладка (нержавеющая сталь)	1	1	0.32 [16]
Полиимидная изоляция	0.2	0.2	0.011
Обмотка горизонтального диполя	1.66	1.66	0.101
Полиимидная изоляция	0.2	0.2	0.011
Обмотка вертикального диполя	1.66	1.66	0.101
Полиимидная изоляция	0.5	0.5	0.011
Магнитопровод	15.4	15.4	5

На рис. 21 и рис. 22 представлены поля температур, полученные при расчетах соленоида 0.3 и соленоида 2.

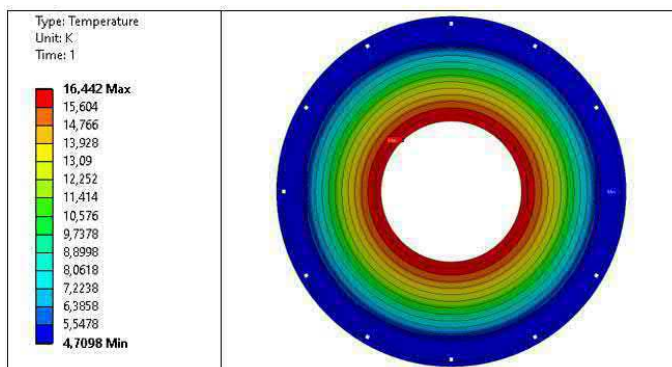


Рис. 21. Поле температуры соленоида 0.3

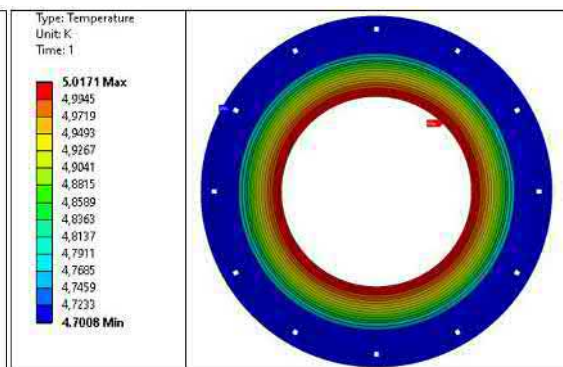


Рис. 22. Поле температуры соленоида 2

В таблице 8 приведены результаты расчета температуры соленоида 0.3 и соленоида 2, где первый слой является внутренним слоем обмотки.

Таблица 8.

Номер слоя	Температура слоев обмотки соленоида	
	Температура. К	
	Соленоид 0.3	Соленоид 2
1	16.44	5.02
2	15.91	5.01
3	15.33	5.00
4	14.59	4.99
5	13.71	4.98
6	12.70	4.96
7	11.58	4.95
8	10.38	4.93
9	9.11	4.91
10	7.81	4.90
11	6.52	4.88
12	-	4.86

Результаты проведенных расчетов показывают, что слои сверхпроводящего кабеля соленоида 0.3 в процессе работы будут нагреваться выше критической температуры 6.2 К. Таким образом, вариант конструкции соленоида 0.3 не является работоспособным. Для соленоида 2 запас до критической температуры 5.8 К составляет 0.78 К. Основными причинами такого различия нагрева обмотки для данных вариантов являются:

1. Толщина обмотки соленоида 0.3 примерно в три раза больше, чем у соленоида 2 (таблица 4), что ухудшает охлаждение внутреннего слоя обмотки, где максимальное магнитное поле.

2. На порядок величины более высокие тепловыделения в соленоиде 0.3, намотанного кабелем из СП провода диаметром 0.3 мм.

Проведенные расчеты показывают:

- мощность тепловыделений 0.33 Вт в обмотке соленоида 2 на порядок величины ниже, чем 3.63 Вт в обмотке соленоида 0.3 за счет меньшего диаметра сверхпроводящих волокон в проводе диаметром 0.85 мм по сравнению с проводом 0.3 мм (таблица 3), а также меньшего, примерно в 3 раза, количества сверхпроводника в обмотке соленоида 2;

- по технологическим соображениям каналы двухфазного гелия для охлаждения обмотки размещены на внешней поверхности магнитопровода. Толщина обмотки соленоида 0.3,

а следовательно ее термическое сопротивление, примерно в три раза больше, чем у соленоида 2 (таблица 4), что ухудшает охлаждение внутреннего слоя обмотки, где максимальное магнитное поле;

- в результате, температура сверхпроводящей обмотки соленоида 0.3 превышает ее критическую температуру, поэтому эта конструкция не работоспособна.

Таким образом, в дальнейших разработках следует использовать конструкцию соленоида 2, намотанного плоским транспонированным кабелем из десяти сверхпроводящих проводов диаметром 0.85 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Осуществлён выбор токнесущего элемента, определены размеры обмотки, интеграл поля, запасенная энергии, индуктивность, рассеянные поля, динамические потери, максимальное поле на обмотке, критическая темпе

2. ратура, пондеромоторные силы, зависимость центрального поля от продольной координаты соленоидов на ток 300 и 2000 А.

3. Выбрана и проанализирована схема защиты соленоида, проведен расчет максимальной температуры в точке перехода сверхпроводящей обмотки в нормальное состояние, которая не превышает 99 К для соленоида 0.3 на ток 300 А и 144 К для соленоида 2 на ток 2 кА.

4. Проведен расчет температуры обмотки соленоидов 0.3 и 2 в процессе изменения тока в этих магнитах, который показал, что температура сверхпроводящей обмотки соленоида 0.3 превышает ее критическую температуру, поэтому эта конструкция не работоспособна.

5. Исследования показывают, что в дальнейших разработках следует использовать конструкцию соленоида 2, состоящую из двенадцати слоев, намотанных плоским транспонированным кабелем из десяти сверхпроводящих проводов диаметром 0.85 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://nica.jinr.ru/ru/>
2. I. Bogdanov, E. Kashtanov, S. Kozub, G. Kuznetsov, L. Tkachenko, V. Pleskach, A. Sery, V. Shiltsev, V. Sytnik, S. Zintchenko, V. Zubko, "Tevatron Electron Lens Magnetic System", Proc. of 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, Illinois, USA, June 18-22, 2001, pp.3630-3633.
3. I. Bogdanov, S. Kozub, P. Shcherbakov, L. Tkachenko, V. Zubko, C. Muehle, G. Moritz, L. Tommasini. "Optimization of a Dipole with Partially Keystoned Cable for the SIS 300" IEEE Trans. Appl. Sup Vol. No 395-398.
4. V.Y. Fil'kin, V.P. Kosenko, V.L. Mette, K.P. Myznikov, A.D. Nikulin, V.A. Vasiliev, G.K. Zelensky, A.V. Zlobin, The Properties of Industrial Superconducting Composite Wire for the UNK Magnets, Adv. in Cryog. Eng., vol. 36 part A (1990) 317.
5. I. Bogdanov, S. Kozub, P. Shcherbakov, P. Slabodchikov, L. Tkachenko, V. Zubko, G. Moritz, V. Sytnikov. "Methods for Reducing Cable Losses in Fast-Cycling Dipoles for the SIS300 Ring". EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 2004, p.p.1750-1752.
6. Г. Брехна. "Сверхпроводящие магнитные системы". "Мир", Москва, 1076, стр. 291, 298.
7. Л. М. Ткаченко. "Пакет программ MULTIC для расчета магнитного поля произвольной конфигурации", препринт ИФВЭ 92-28, 1992, 48 стр.
8. I. Bogdanov, S. Kozub, P. Shcherbakov, L. Tkachenko, E. Fischer, G. Moritz and F. Klos, 2004, "Study of Electrical Steel Magnetic Properties for Fast Cycling Magnets of SIS100 and SIS300 Rings", Lucerne, Switzerland, p. 1741.
9. Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 3000ГэВ». Том 9, альбом 2, 286-VII-03-9-02, Серпухов 1990, стр.55.
10. L. Rossi, "Superconducting Magnets for Accelerators and Detectors", Cryogenics v.43, no.3-5, 2003, pp.281-301.
11. [11] Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. Основы работы в ANSYS 17. Москва, ДМК Пресс, 2017.
12. С.С. Козуб. Разработка и создание сверхпроводящих устройств и систем криогенного обеспечения для ускорителей и каналов транспортировки пучков частиц высоких энергий. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Протвино, 2011.
13. J. Lawrence, A.B. Patel and J.G. Brusson. The thermal conductivity of Kapton HN between 0.5 and 5K. Cryogenics 40 (3), 2000.
14. Л.А. Новицкий, И.Г. Кожевников. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Издательство: «Машиностроение» Москва, 1975.
15. М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков. Справочник по физико-техническим основам криогеники. «Энергия» Москва, 1973.

Поступила в редакцию / Received 05.05.2025

Поступила после рецензирования / Revised 26.06.2025

Принята к публикации / Accepted 02.06.2025