



Криогенные и сверхпроводящие электроэнергетические устройства (000025237)

Лекция
II

Профессор Е.Ю.Клименко



Сверхпроводящие магнитные системы

Пример проекта крупного сверхпроводящего магнита

Прежде чем приступить к изучению отдельных элементов проектирования сверхпроводящих устройств, полезно сделать обзор конкретного проекта, чтобы осознать связь и иерархию этих отдельных элементов.

На предварительном этапе проектирования следует представить себе, как магнит будет эксплуатироваться, как он будет закреплен, как он будет снабжаться хладагентом и пр.

Проектирование начинается с разработки технического задания, причем в случае СП магнита ТЗ обычно разрабатывается исполнителем по ТТ заказчика.



Сверхпроводящий магнит сепаратора изотопов гадолиния

Технические требования:

Диаметр и длина устройства, помещаемого в полость магнита (0.9 х 7 м

Величина поля 3.5 Тл -4

Степень однородности поля. 2.0 l0 при длине 4.5 м и диаметре 0.45 м

Доступность обслуживания устройства.

Техническое задание

ТЗ составляется после предварительных оценок проекта.

Размеры обмотки.

Рабочие параметры.(величина поля, рабочий ток)

Выбор материала. Расход материала.

Способ защиты обмотки

Способ обеспечения рабочей температуры.

Теплопритоки, расход хладагента.

Конструкция криостата или вакуумной оболочки.

Вспомогательное оборудование.

Соответствие стандартам.

Смета.

План-график изготовления

ТЗ не только технический, но и политический документ

Расчет обмотки

Расчет обмотки относится к классу обратных задач. Такие задачи не имеют корректной постановки.

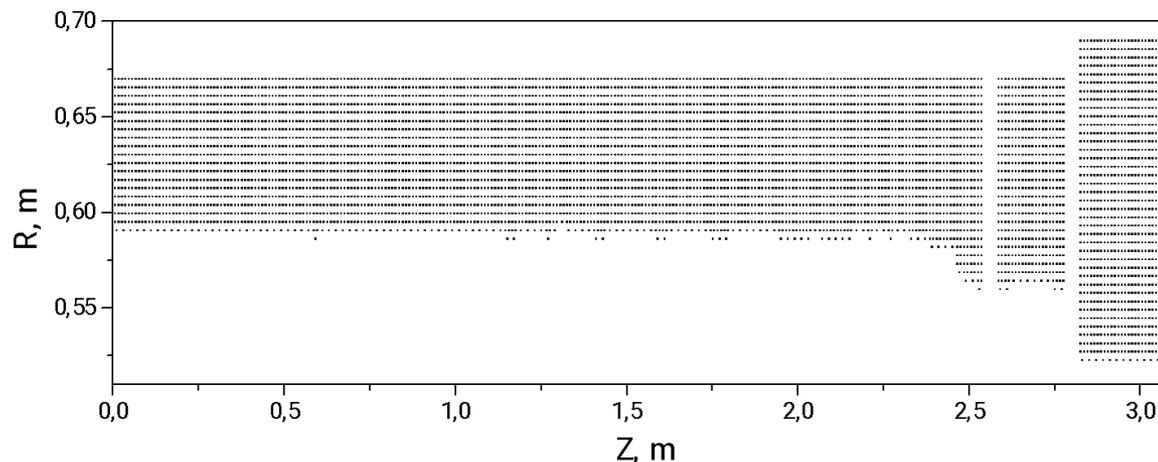
Корректно поставленная задача: (Жак Адамар)

1.Решение существует.

2.Решение единственно.

3.Решение непрерывно зависит от данных в некоторой разумной топологии

Решение некорректно поставленных задач – развитая ветвь современной математики (А.Н.Тихонов)

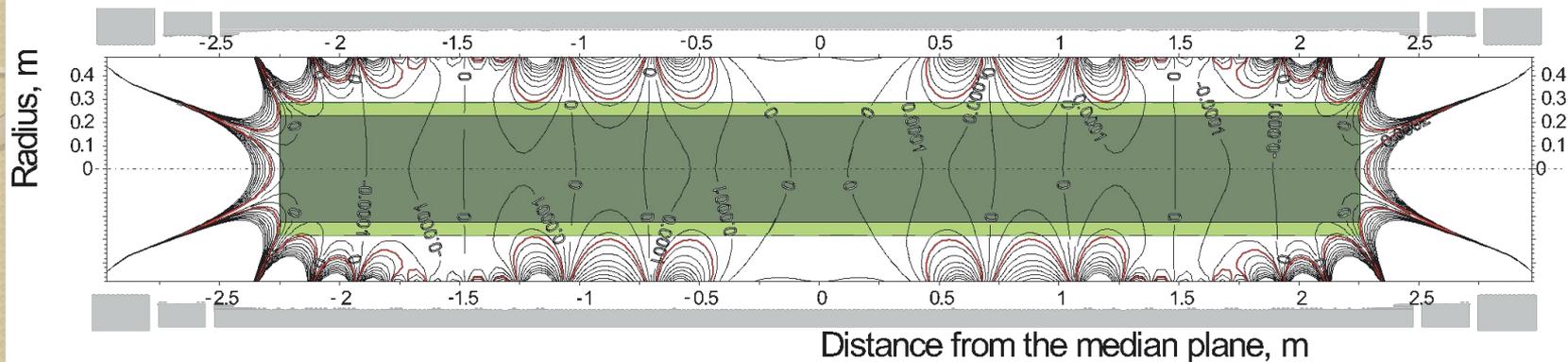


Каждая точка соответствует одиночному витку.

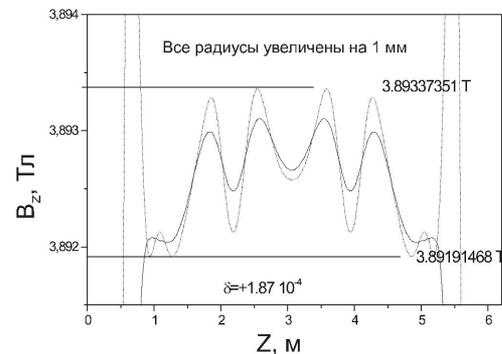
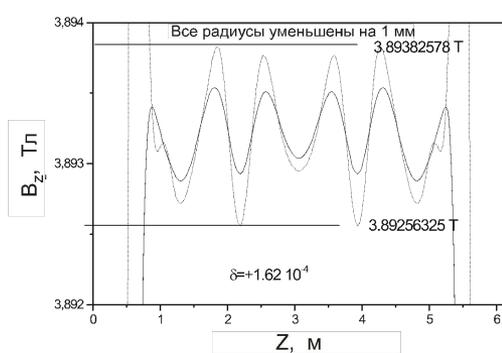
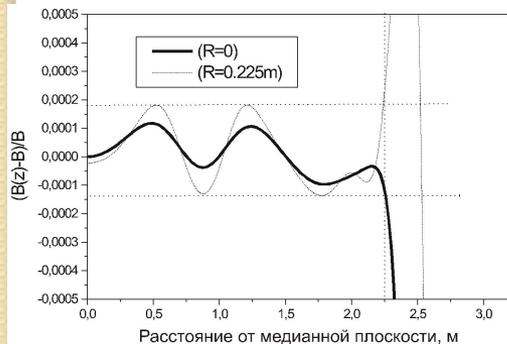
Эта обмотка построена методом подбора. Как оказалось, это не лучшее решение.

Результат подбора однородности поля

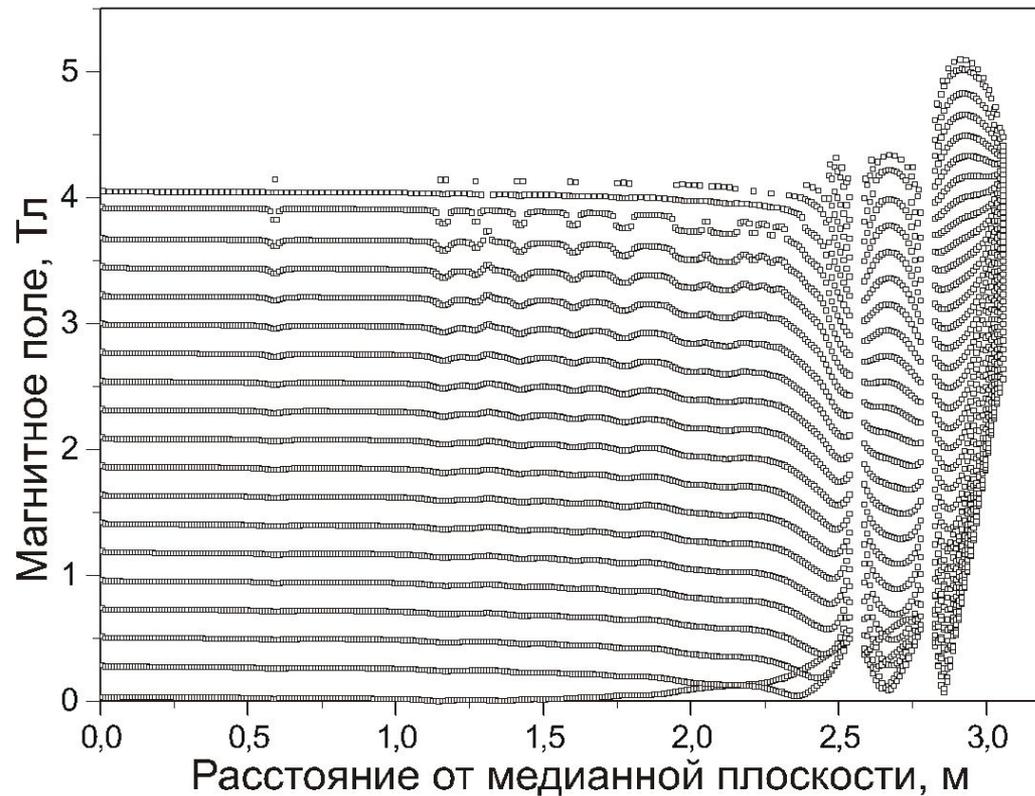
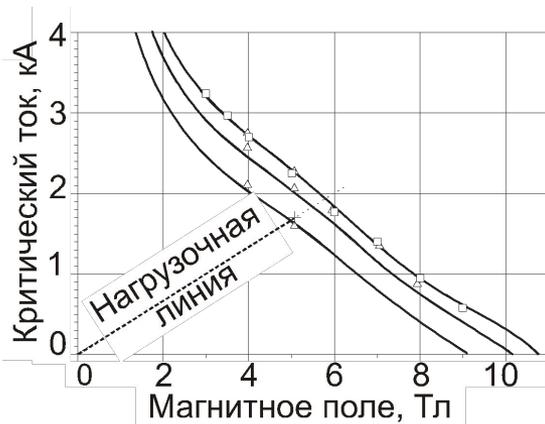
Номинальная топография поля



Следует оценить, как допуски на изготовление обмотки повлияют на результат

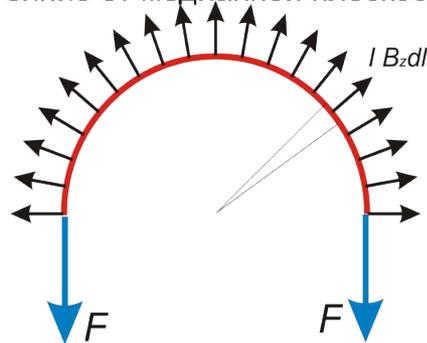
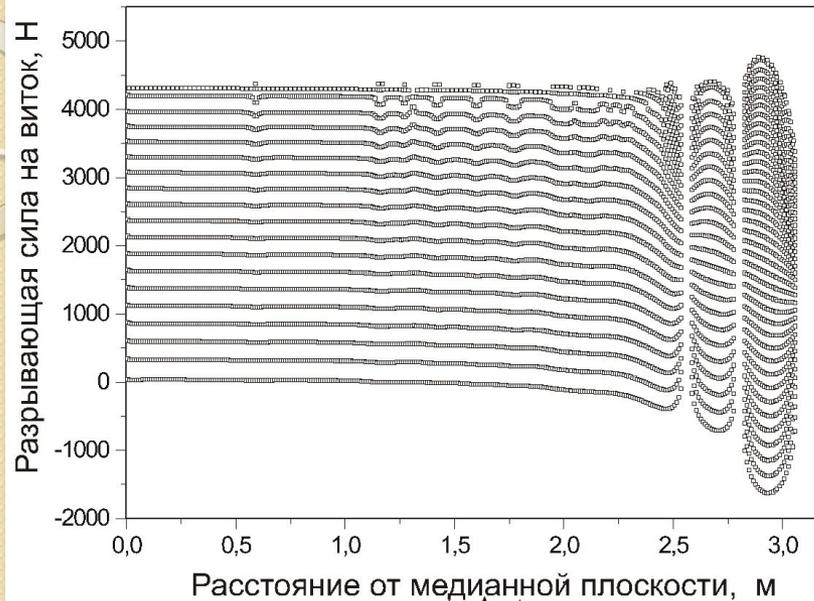


Расчет максимального поля на обмотке



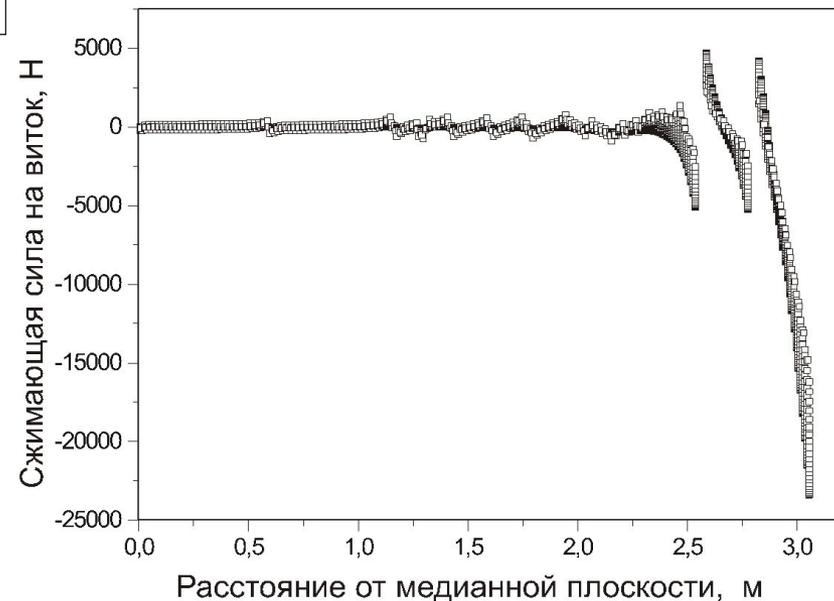
Этот расчет определяет максимально достижимый рабочий ток

Расчет усилий в обмотке



$$F_{\text{разр}} = \int_0^{\pi/2} I B_z r d\alpha = I B_z r$$

$$F_{\text{акс}} = 2\pi r I B_r$$



Галетная обмотка

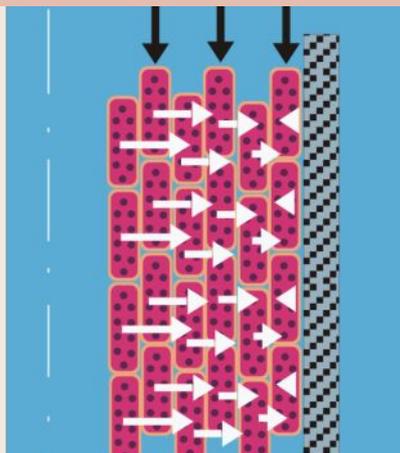


Обмотка состоит из последовательно соединенных двадцатигалетных блоков. Предполагали впервые использовать разработанный способ изготовления многогалетных обмоток. Ранее был известен способ изготовления лишь двойных галет.

Бандажирование обмотки (восприятие радиальных сил)

Обычно применяют внешний бандаж. Мы приклеиваем галеты к жестким листам (нерж. сталь, Амг, стеклотекстолит) Каждый виток передает радиальную силу непосредственно структуре

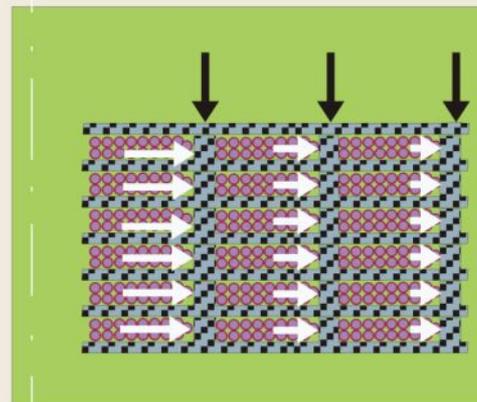
Структура, генерирующая сильные возмущения в проводнике



Радиальная сила сжимает кипу витков, покрытых мягкой изоляцией

Многослойная структура, намотанная проводом, заключенным в мягкую изоляцию, не может быть жесткой, поэтому она будет генерировать мощные возмущения.

Структура, генерирующая минимум возмущений в проводнике



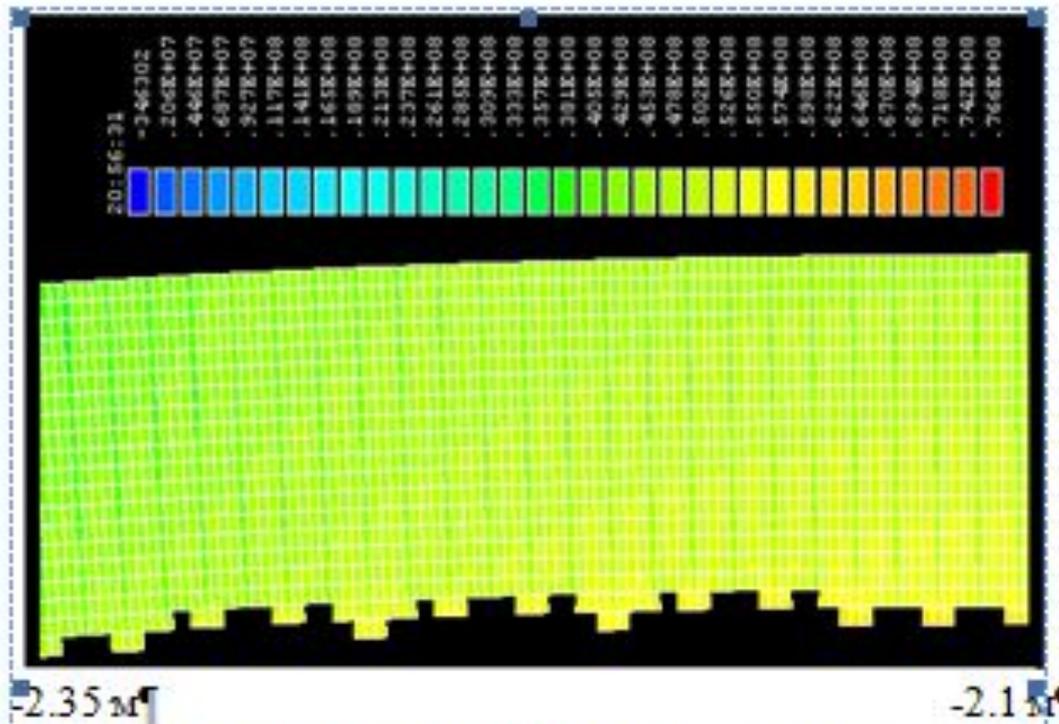
Каждый виток передает радиальную силу непосредственно структуре

Жесткость ламинарной обмотки обеспечивается силовой структурой. Провод нагружен минимально.

Это позволяет обмотки на большие поля делать столь же уверенно, как и на малые

Расчет напряжений в обмотке

Существует много продвинутых пакетов (ANSYS, Comsol и др.), позволяющих рассчитать напряжения и деформации конструкций, в том числе и обмоток.



$$\sigma_{\text{макс}} = 40 \text{ МПа}$$

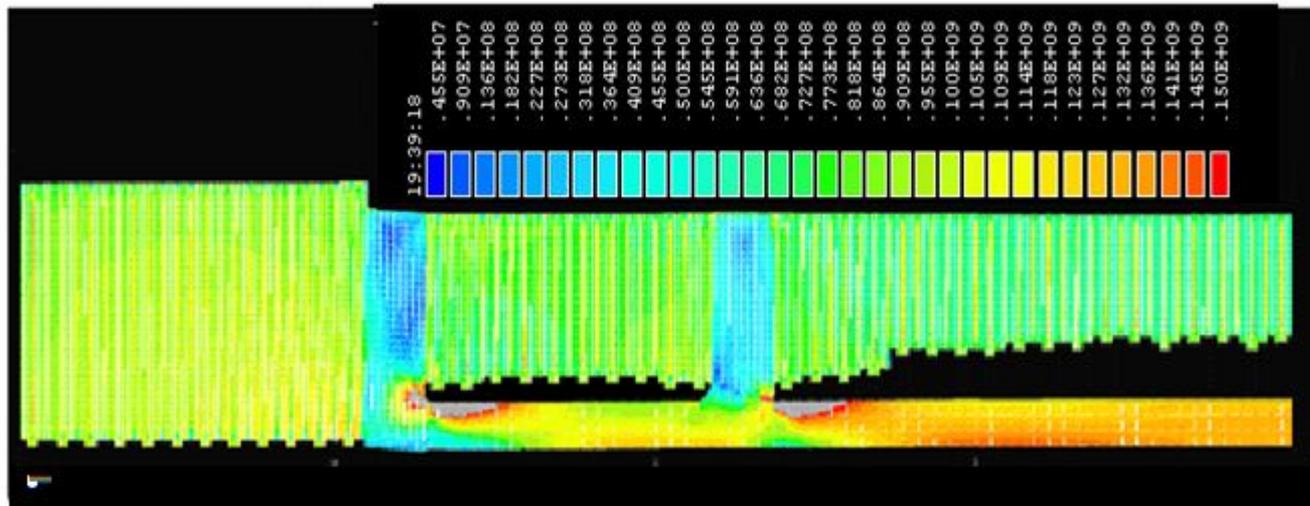
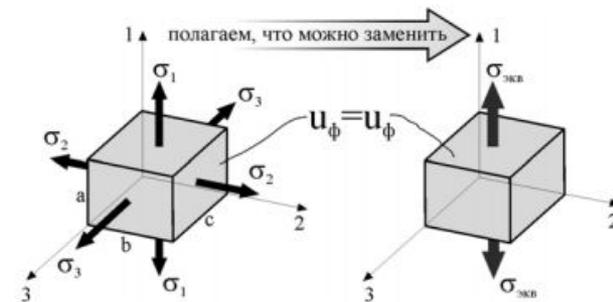
Рис. 2.3 Карта окружных напряжений в обмотке, состоящей из галет, приклеенных к дискам из сплава АМг6

Расчет прочности обмотки

Критерий максимального напряжения по Мизесу основано на теории Мизес-Хенки Mises-Hencky, известной также как теория максимальной энергии формоизменения.

В исчислении главных напряжений s_1 , s_2 и s_3 , напряжение по Мизесу выражено как:

$$s_{\text{vonMises}} \text{ bsp;} = \{[(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_1 - s_3)^2]/2\}^{(1/2)}$$

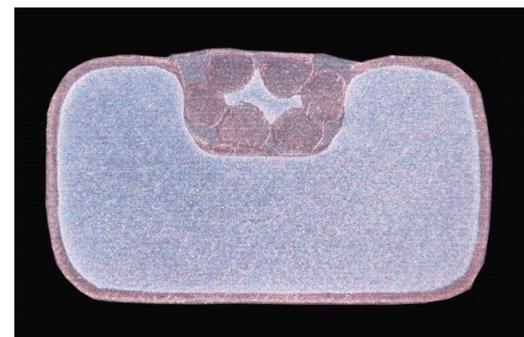
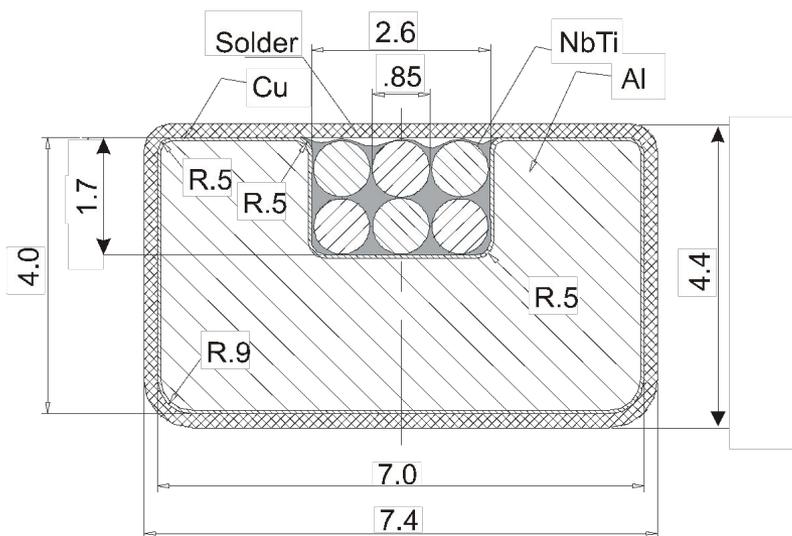


Эквивалентные напряжения, обусловленные тепловой деформацией и магнитными силами в обмотке, армированной листами из нержавеющей стали. Материал опорных элементов так же нержавеющая сталь.

Основные параметры обмотки

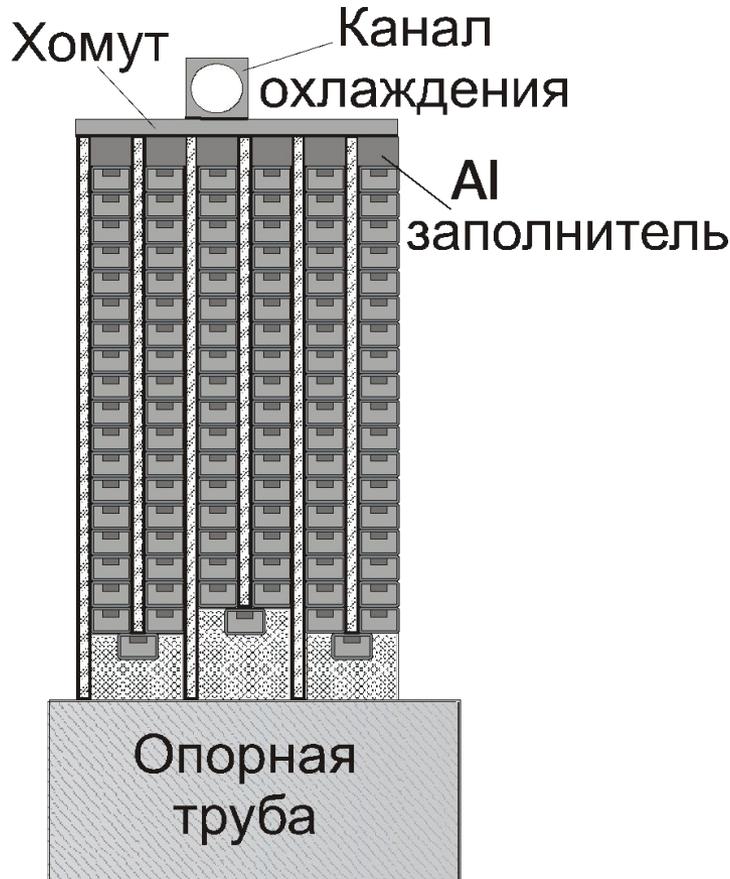
Размеры обмотки		
Внутренний диаметр обмотки средней секции	мм	1176
Внутренний диаметр обмотки промежуточной секции	мм	1124
Внутренний диаметр обмотки крайней секции	мм	1048
Наружный диаметр обмотки средней секции		1344
Наружный диаметр обмотки промежуточной секции	мм	1344
Наружный диаметр обмотки крайней секции	мм	1384
Длина обмотки	мм	6100
Число блоков		5
Число галет суммарное		596
Полный расход обмоточного провода	км	49
Индуктивность	Гн	33.17
Номинальный рабочий ток	А	1700
Максимальная индукция на обмотке	Тл	5.09
Номинальная индукция в рабочей области	Тл	4.0
Расчетная рабочая температура	К	4.5
Запасенная энергия при номинальном токе	М	48
	Дж	
Охлаждаемая масса	т	11.3

Обмоточный провод



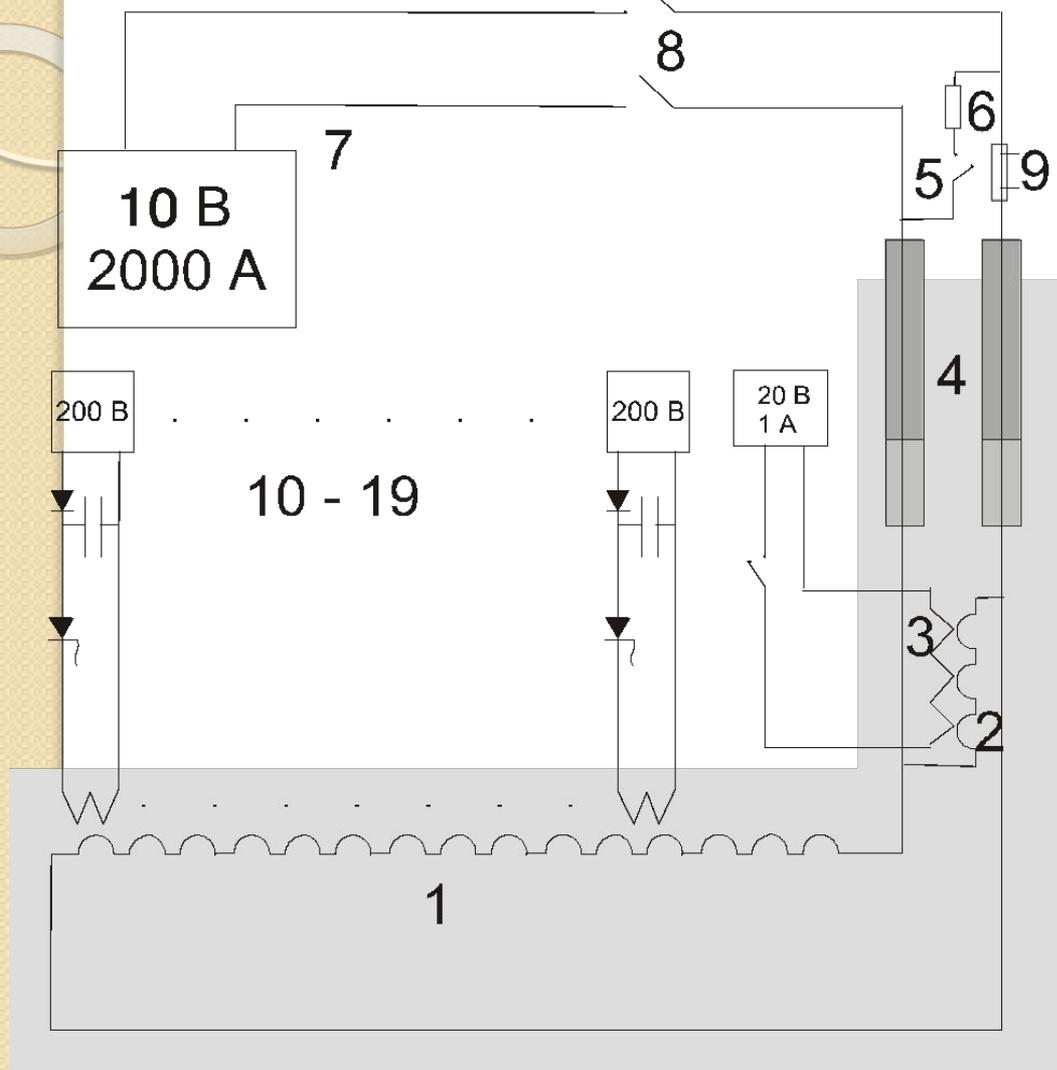
Проект разрабатывался в 2000 г. В это время не было производства сверхпроводников в РФ . Провод куплен по случаю из старых запасов.

Технология изготовления обмотки



Листы изолированы стеклотканью (препрег). Галеты наматываются неизолированным проводом, между витками прокладывается стеклотекстолитовая ленточка. При сборке листы покрывают пленочным клеем. Поверх последнего витка каждой галеты накладывается алюминиевый пруток. Блок нагревают до 120 град С и зажимают в кондукторе, стягивая до расчетной длины. В кондукторе же термообработывают 170 град/3 час для полимеризации клея. Затем поверхность обрабатывают на токарном станке, срезая излишки алюминия. На подготовленную цилиндрическую поверхность надевают охлаждающий хомут.

Система питания и защиты



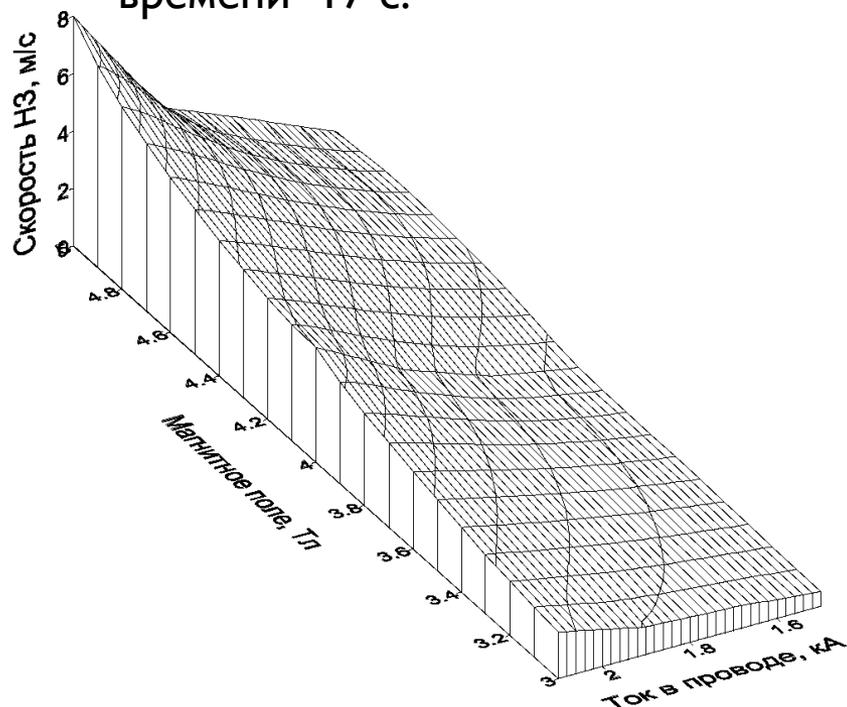
1. Обмотка сверхпроводящего соленоида,
2. Тепловой сверхпроводящий ключ,
3. Нагреватель теплового ключа,
4. Комбинированные токовводы,
5. Выключатель защиты теплового ключа,
6. Защитное сопротивление 0.24 Ом,
7. Тиристорный стабилизированный источник тока,
8. Размыкатель цепи питания магнита,
9. Точный измерительный шунт,
- 10-19-Цепи импульсных защитных нагревателей.

Необходимость защиты обмотки

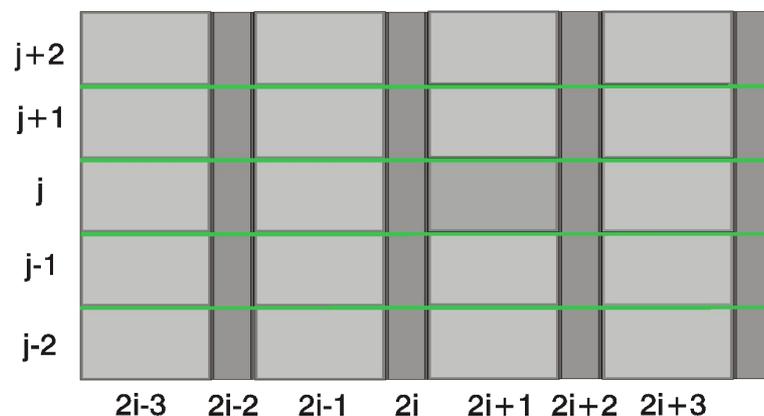


Скорость распространения нормальной зоны

Чтобы вывести запасенную энергию из обмотки на внешнее сопротивление 2 Ом, напряжение должно быть 3.5 кВ, а постоянная времени 17 с.



Зависимость скорости линейного распространения нормальной зоны в проводе от тока и индукции. Этой скорости недостаточно для эффективной защиты.

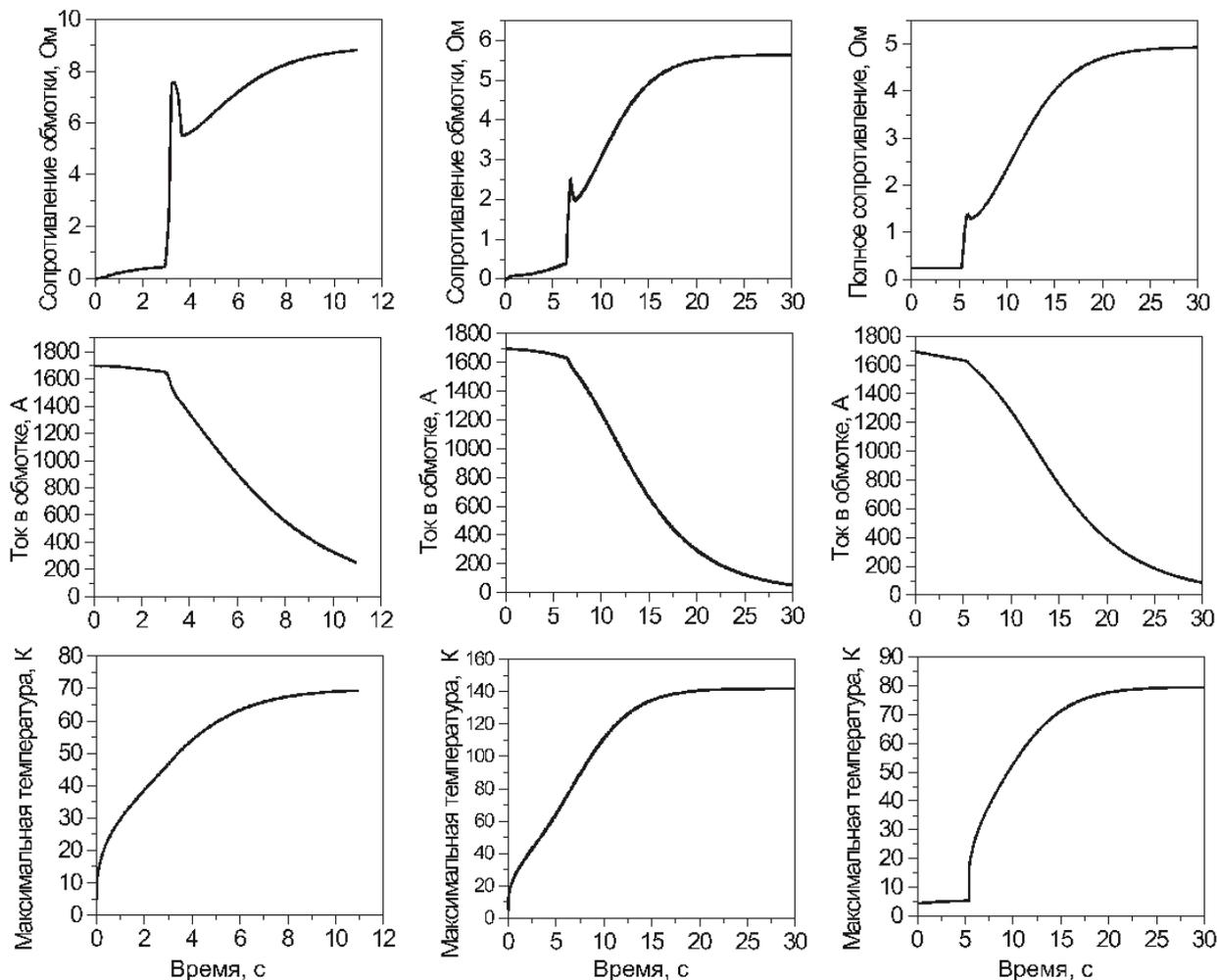


Расчетная схема определения поперечной скорости распространения нормальной зоны в обмотке

Защита форсированным переводом обмотки в нормальное

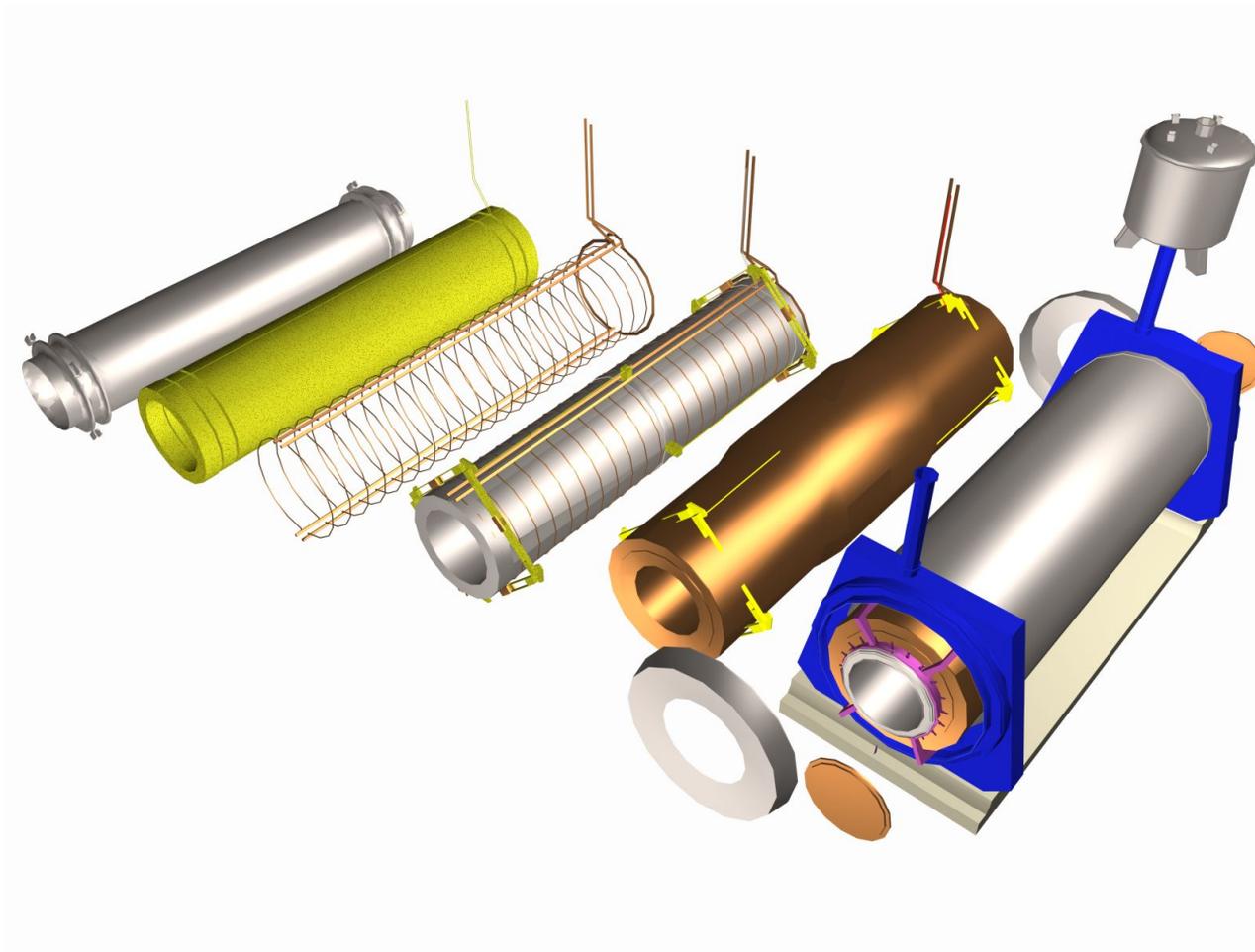
состояние
Результаты

расчетного
исследования
процесса перехода
сверхпроводящего
магнита в
нормальное
состояние.

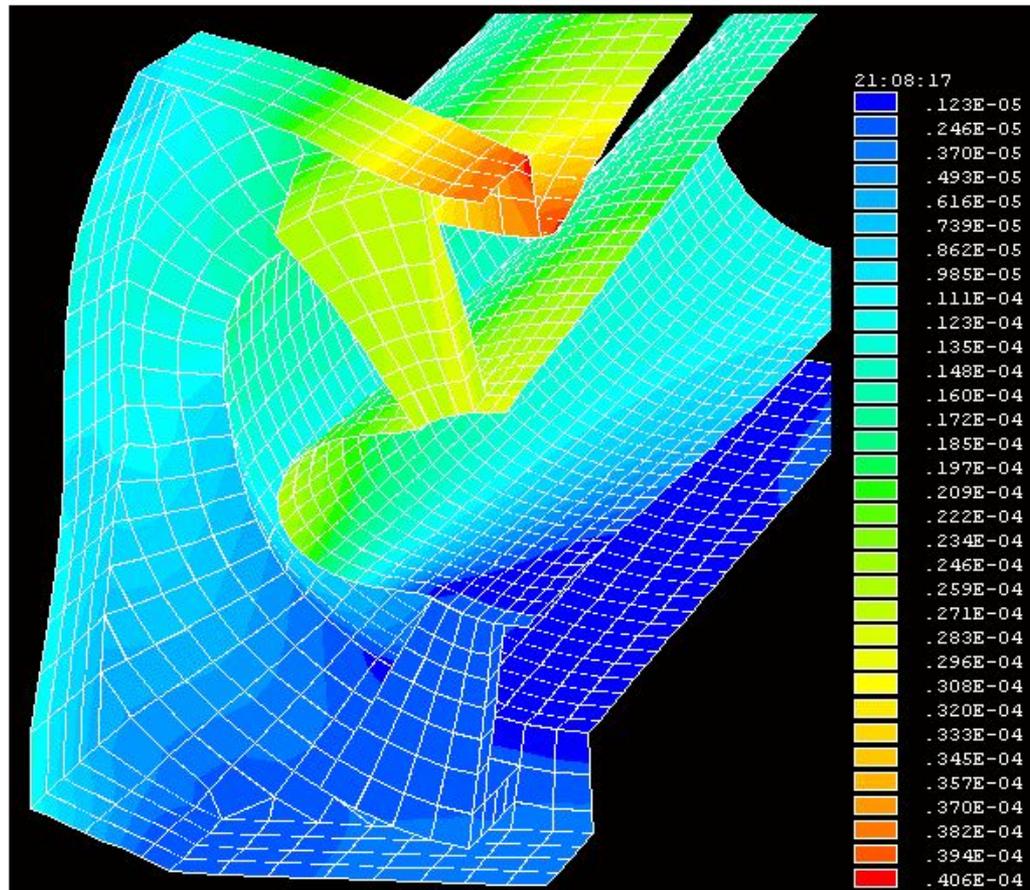


А. Случай возникновения нормальной зоны в серединной, третьей секции (максимального объема), Б. Случай возникновения нормальной зоны во второй или четвертой секции (минимального объема). В. Переход обмотки, при переходе в нормальное состояние теплового ключа и затухании тока на защитном сопротивлении.

Система охлаждения

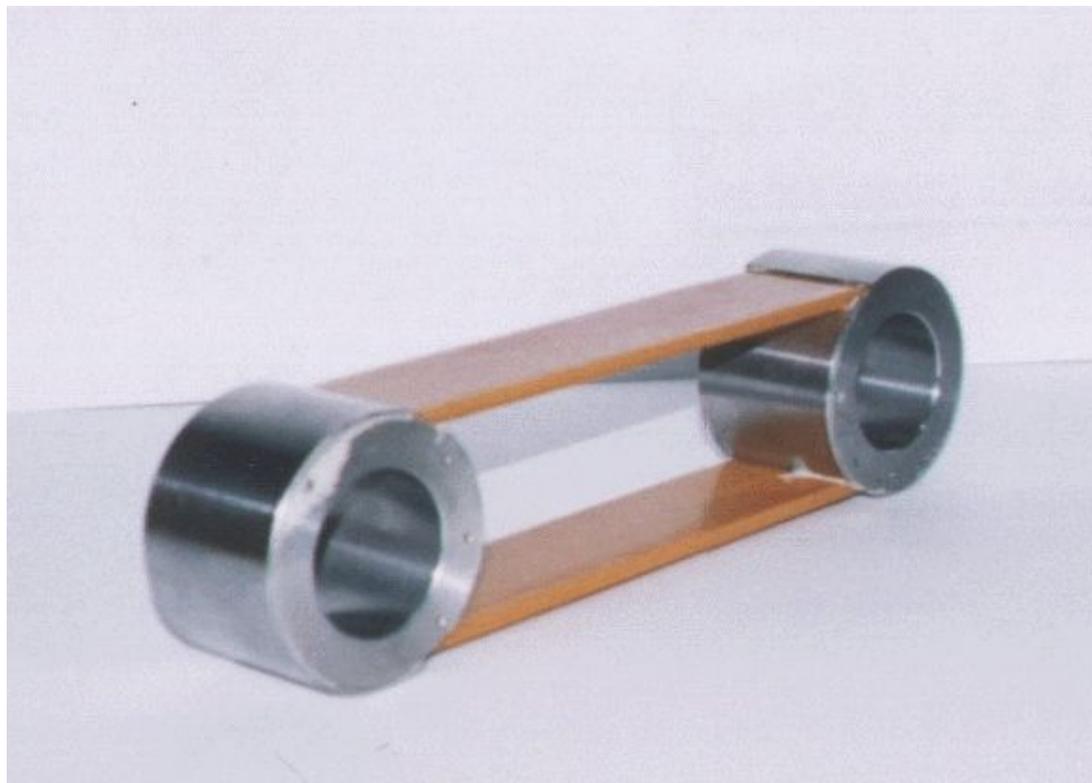


Вакуумная оболочка



Деформация вакуумной оболочки под действием веса соленоида.
Максимальное перемещение составляет 40 мкм.

Стеклотекстолитовый элемент подвеса обмотки



Стеклонить намотана с равным натяжением, поэтому в сечении напряжения распределены равномерно, т.е. работает все сечение. Разрушающая сила более 10 т.с.

Теплоприток

Теплопритоки к экранам теплопроводностью, излучением

экраны 80 К

Вт 121.4

экраны 30 К

Вт 5.2

Теплопритоки к экранам по горловинам

экраны 80 К

Вт 35.1

экраны 30 К

Вт 1.24

Теплоприток к 30К-теплообменнику токоввода

Вт

8.9/22

Теплопритоки к гелиевой емкости питателя

по токовводам (без охлаждения)

мВт

3.84

по горловинам

Вт 0.038

излучением и по остаточному газу

Вт

0.04

Теплопритоки к сверхпроводящему магниту

излучением и по остаточному газу

Вт

0.21

по опорам

Криогенное обеспечение обмотки

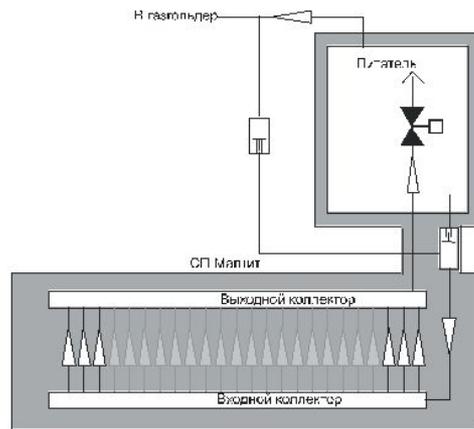


Схема охлаждения обмотки СП магнита посредством термосифона

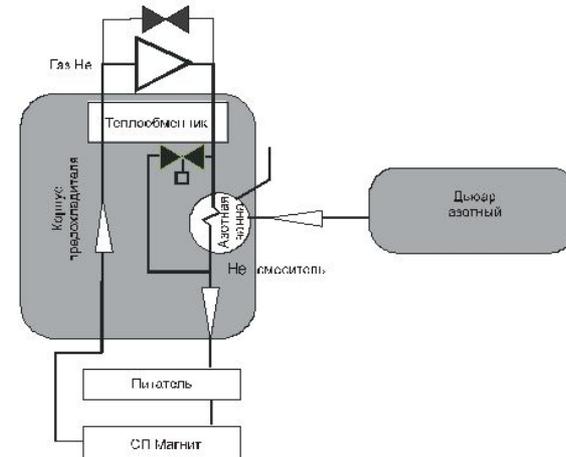


Схема предварительного охлаждения обмотки до 90К

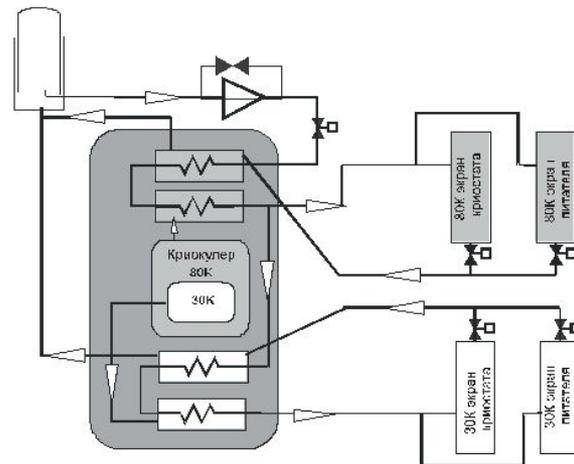
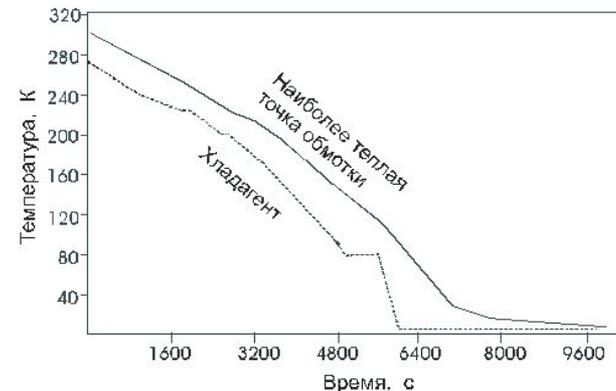


Схема охлаждения экранов СП магнита и питателя потоками газообразного гелия, охлаждаемыми криокулером



Временная диаграмма охлаждения обмотки. Максимальный температурный перепад в обмотке не превышает 40 К.



Спасибо за внимание