



НИИЭФА
РОСАТОМ

Разработка обмоточных проводов из ВТСР-2 для электромагнитных систем нового поколения

В рамках открытого научного семинара «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»

ФП «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» КП РТТН

Тема семинара: «Текущее состояние в разработке сверхпроводящих проводов для перспективных ЭМС»

Докладчик: Запретилина Е.Р.

Главный специалист НТЦ «СИНТЕЗ» АО «НИИЭФА»

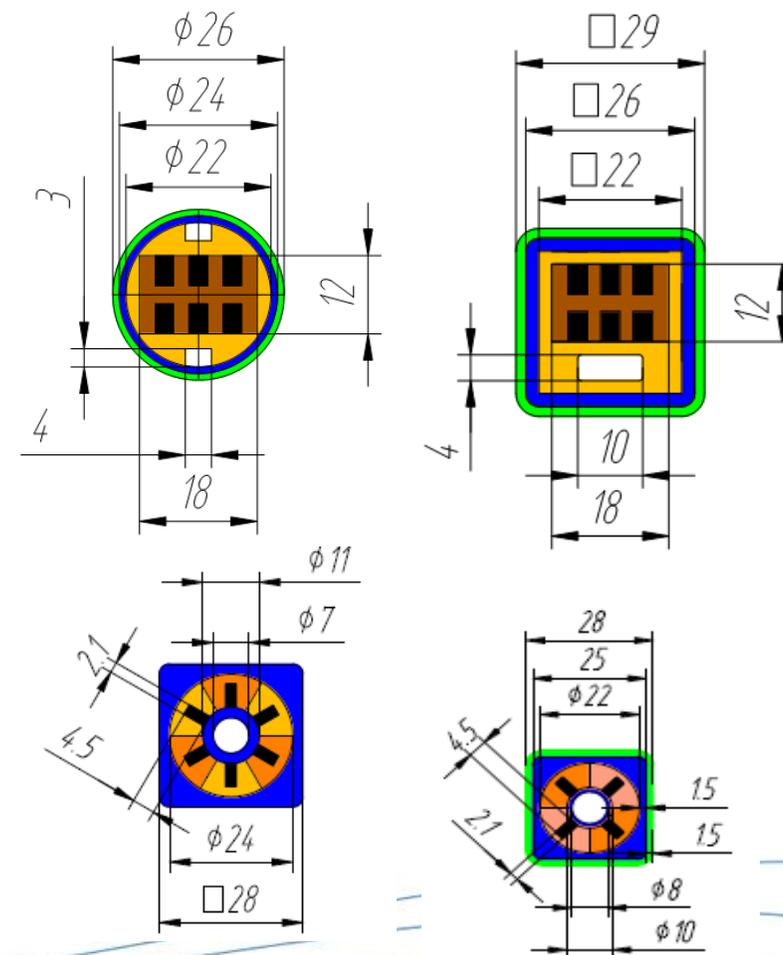
ЭМС нового поколения: ТРТ Технические требования к проводникам



НИИЭФА
РОСАТОМ

1. ЭМС ТРТ имеет жесткие ограничения по габаритам обмоточного провода

Обмотка	Тип провода	Размеры провода без изоляции	Размер канала охлаждения
ОТП	круглый в тонком кожухе	Ø 24 мм	не менее 24 мм ²
ОИ	прямоугольный/ квадратный	26мм×26 мм	не менее 40 мм ²
ОУ	прямоугольный/ квадратный	28мм×28 мм	не менее 38 мм ²
КК	прямоугольный/ квадратный	25мм×25 мм	~40-50 мм ²



Технические требования к проводникам



НИИЭФА
РОСАТОМ

2. ЭМС ТРТ предъявляет высокие требования к рабочим характеристикам проводника

<i>Обмотка</i>	<i>Максимальный рабочий ток, кА</i>	<i>Максимальная индукция магнитного поля, Тл</i>	<i>Максимальная рабочая температура, К</i>	<i>Конструктивная плотность тока по проводу без изоляции, А/мм²</i>
<i>ОТП</i>	<i>77</i>	<i>15,5</i>	<i>15</i>	<i>170</i>
<i>ОИ</i>	<i>63</i>	<i>17</i>	<i>20</i>	<i>93</i>
<i>ОУ1/ ОУ6</i>	<i>50</i>	<i>9</i>	<i>15</i>	<i>64</i>
<i>ОУ2/ ОУ3</i>	<i>40</i>	<i>6</i>	<i>15</i>	<i>52</i>
<i>ОУ4/ ОУ5</i>	<i>30</i>	<i>3</i>	<i>15</i>	<i>40</i>
<i>КК</i>	<i>20</i>	<i>1,5-3</i>	<i>15</i>	<i>35</i>

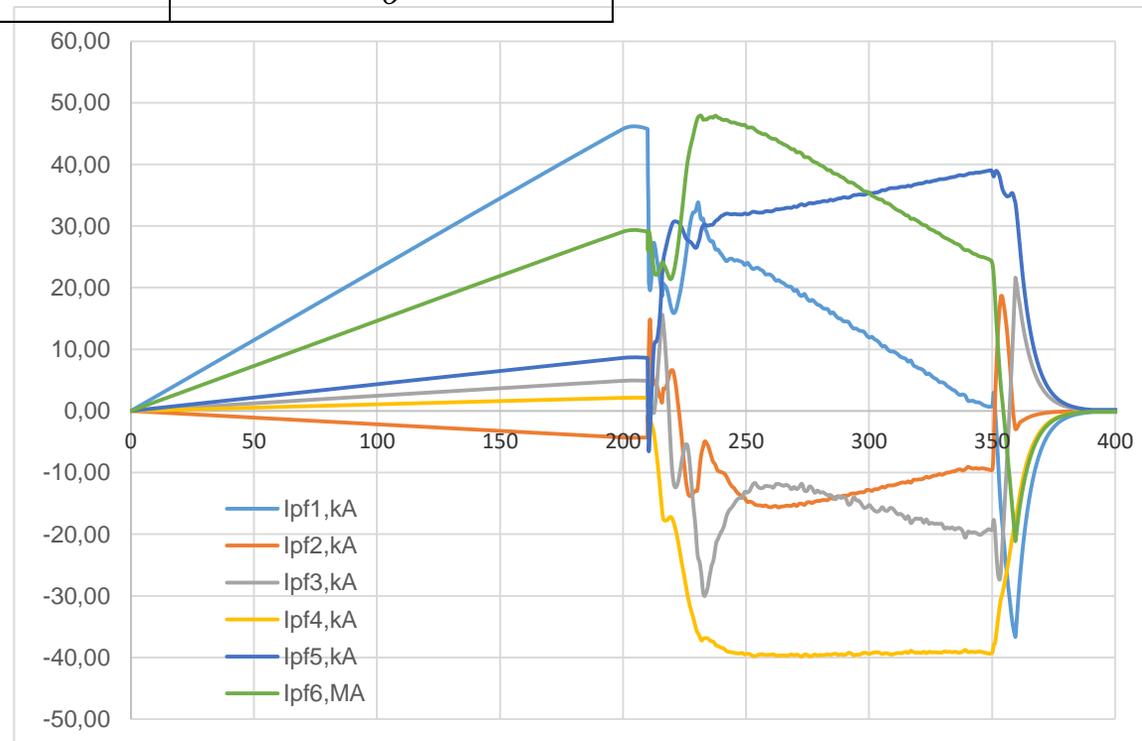
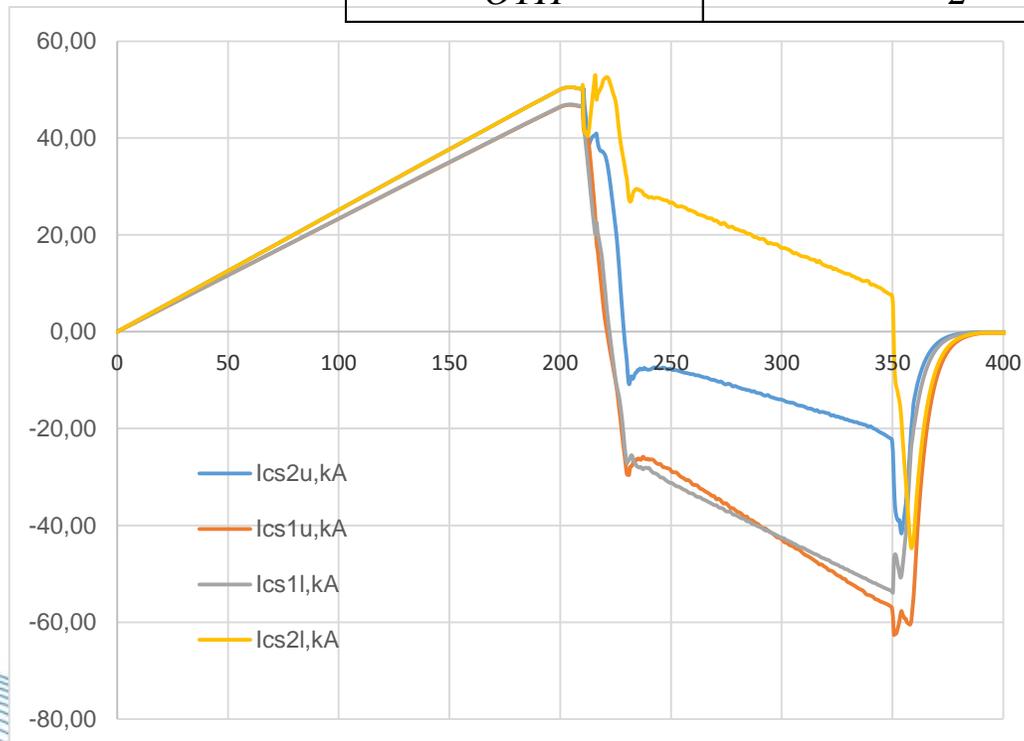
Технические требования к проводникам



НИИЭФА
РОСАТОМ

3. Проводник ЭМС ТРТ работает в быстроизменяющемся магнитном поле

Обмотка	Максимальная скорость изменения индукции магнитного поля, Тл/с	Максимальная скорость изменения рабочего тока, кА/с
ОИ	12,7	53,5
ОУ	3-11,2	30-70
ОТП	2	0



Технические требования к проводникам



НИИЭФА
РОСАТОМ

3. Проводник ЭМС ТРТ работает в быстроизменяющемся магнитном поле:

По предварительным оценкам для соблюдения температурного режима ($T_{op} < 15-20\text{ K}$) тепловыделения в проводе за полный цикл работы ЭМС на должны превышать $3,9\text{кДж/м}$ длины провода.

4. Рабочий ток (рабочая плотность тока) в ленте на должен превышать 80% величины критического тока, оцененного для максимальных рабочих значений индукции магнитного поля и температуры

<i>Рабочая температура, К</i>	<i>Индукция магнитного поля, Тл</i>	<i>Критическая плотность тока при ориентации вектора поля \perp плоскости ленты, А/мм ширины ленты</i>
<i>4,2</i>	<i>17</i>	<i>125</i>
<i>20</i>	<i>17-18</i>	<i>75</i>

5. К материалу стабилизирующей матрицы предъявляются следующие требования:

- *механические характеристики материала должны быть не хуже, чем у серебросодержащей меди*
- *электропроводность матрицы должна быть такой, чтобы разогрев провода при защитном выводе не превышал на 200К*

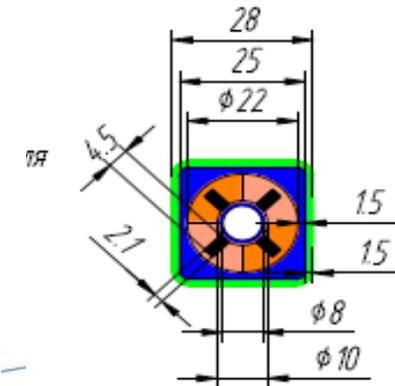
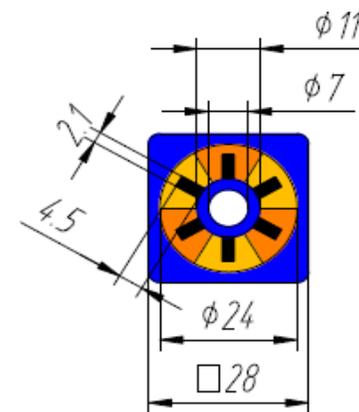
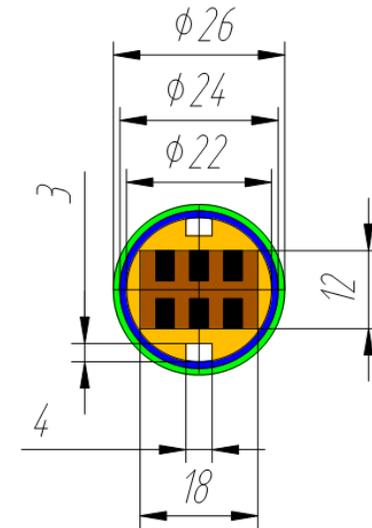
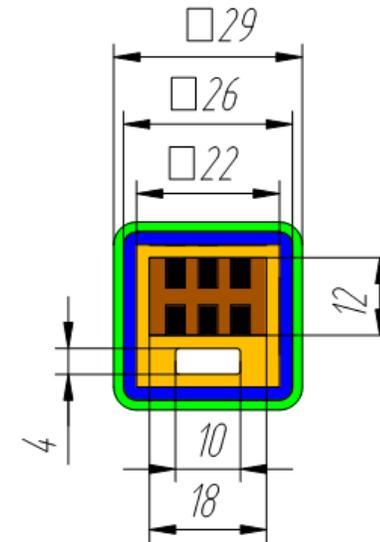
Обмоточные провода ЭМС ТРТ



НИИЭФА
РОСАТОМ

тип кабеля	ток	поле	кол-во лент	кол-во стопок	кол-во лент в стопке	обмотка
MiST1	63 кА	17Тл	240	6	40	ОИ
MiST2	77кА	15,5 Тл	240	6	40	ОТП

тип кабеля	ток	поле	кол-во лент	кол-во стопок	кол-во лент в стопке	обмотка
VSS1	50 кА	9Тл	120	6	20	ОУ1, ОУ6
VSS2	40кА	6 Тл	80	4	20	ОУ4, ОУ5
VSS3	30кА	3 Тл	60	4	15	ОУ2, ОУ3
VSS4	20 кА	1,5 -3 Тл	60	4	15	КК



ЕОТП- СП- 469: Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 для электромагнитных систем нового поколения



НИИЭФА
РОСАТОМ

Цель НИОКР: Разработка и испытания макетов и моделей обмоточных проводов из высокотемпературного сверхпроводника ВТСП-2 для электромагнитных систем (ЭМС) нового поколения, способных работать в магнитном поле 20 Тл при температуре 20 К.

I Этап (2022-2023 г):

- **Разработка конструкций ВТСП-2 проводов для сверхпроводниковых магнитных систем нового поколения класса 20 Тл, 20 К, ток 5-8 кА**
- **Разработка программы и методики испытаний макетов провода из ВТСП-2 класса 20 Тл, 20 К на ток 5-8 кА**
- **Изготовление макетов провода из ВТСП-2 класса 20 Тл, 20 К на ток 5-8 кА**
- **Испытания макетов провода из ВТСП-2 класса 20 Тл, 20 К на ток 5-8 кА**

II Этап (2023г):

- **Разработка конструкций ВТСП-2 провода для сверхпроводниковых магнитных систем нового поколения класса 20 Тл, 20 К, ток 50-80 кА**
- **Разработка программы и методики испытаний макета провода из ВТСП-2 класса 20 Тл, 20 К на ток 50-80 кА**
- **Изготовление и испытания короткого образца макета провода из ВТСП-2 класса 20 Тл, 20 К на ток 50-80 кА**

➤ **при температуре 20 К**



Этап I Обмоточные провода класса 20Тл 20 К на ток 5- 8 кА: образцы и испытания

Тип испытания	образец	Установка	План
Токонесущая способность при $T = 4,2 - 20$ К	короткий (500 мм) прямой образец (№1)	ЛИС-12	2022г -2 образца 2023 г -1 образец
Механическая нагрузка [$I \times V$] циклическая	короткий (500 мм) прямой образец (№1)	ЛИС-12	2022г -2 образца 2023 г -1 образец
Воздействие нагрузки при изгибе	Образец 5 м – 2-х витковая катушка (№2)	Азотный объем	2022г -3 образца
Токонесущая способность при азотной температуре (вспомогательный тест)	короткий (500 мм) прямой образец (№1 или №3)	Азотный объем	2022г
Диссипативные характеристики (потери) в изменяющемся магнитном поле (при $T = 4,2 - 20$ К)	короткий (500-800 мм) прямой образец (№3)	Дипольный магнит	2023 – 3 образца

ОТП- СП- 469: Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 для электромагнитных систем нового поколения



НИИЭФА
РОСАТОМ

Стенд ЛИС-12

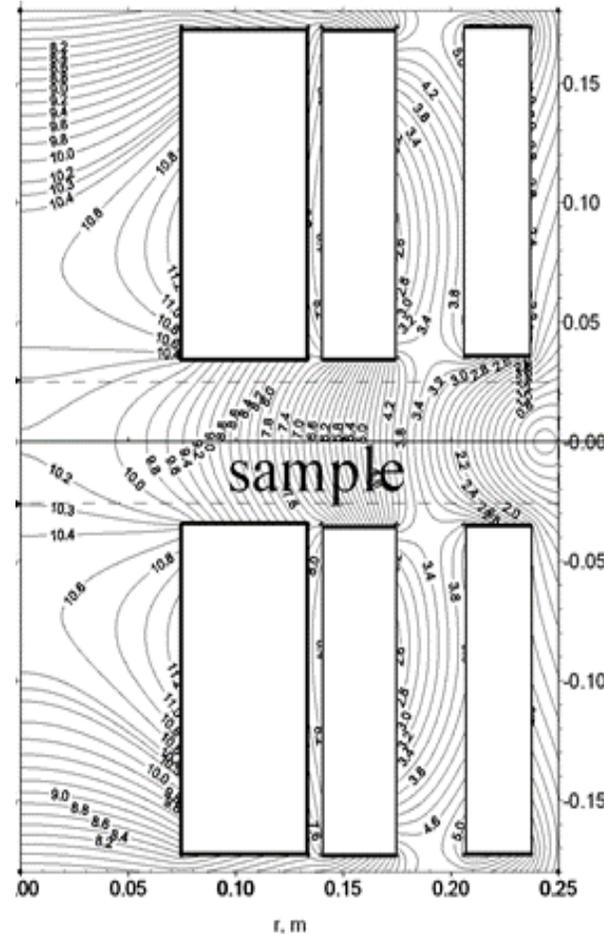


фланец криостата с токовыми вводами, вводами азота и гелия, и с диагностическим и выводами

токовводы, 3 пары

токовые перемычки подвода питания к макету

испытательный магнит ЛИС-12 с установленным макетом провода



Стенд ЛИС-12 - расщепленный трех-секционный магнит
внутренние секции - провода на основе Nb_3Sn
внешняя – из $NbTi$ кабеля.

Основные характеристики магнита:

- Максимальный рабочий ток – 3,5 кА
- длина рабочей зоны – 140 мм
- максимальное магнитное поле на оси симметрии рабочей зоны – 9,3 Тл

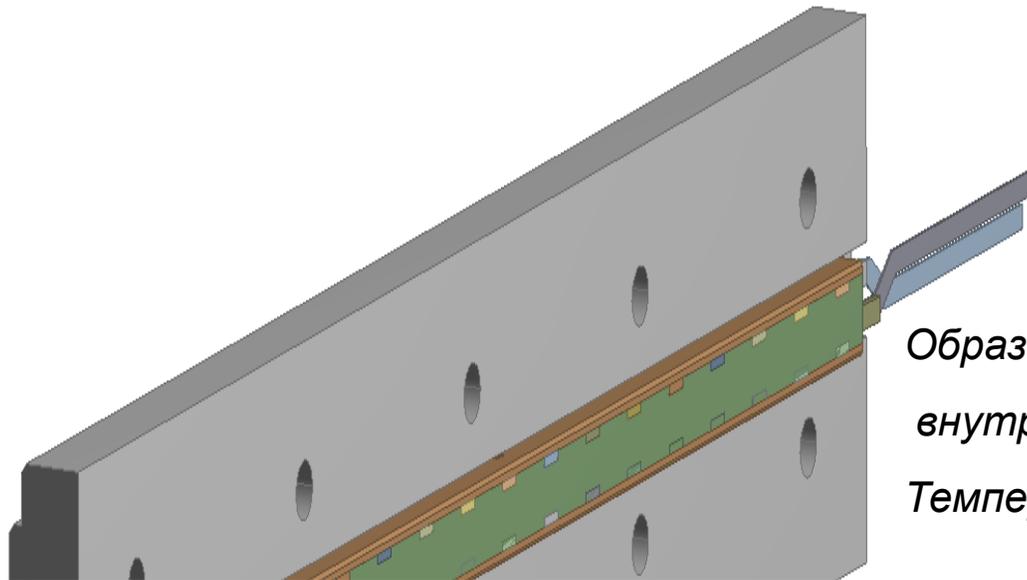
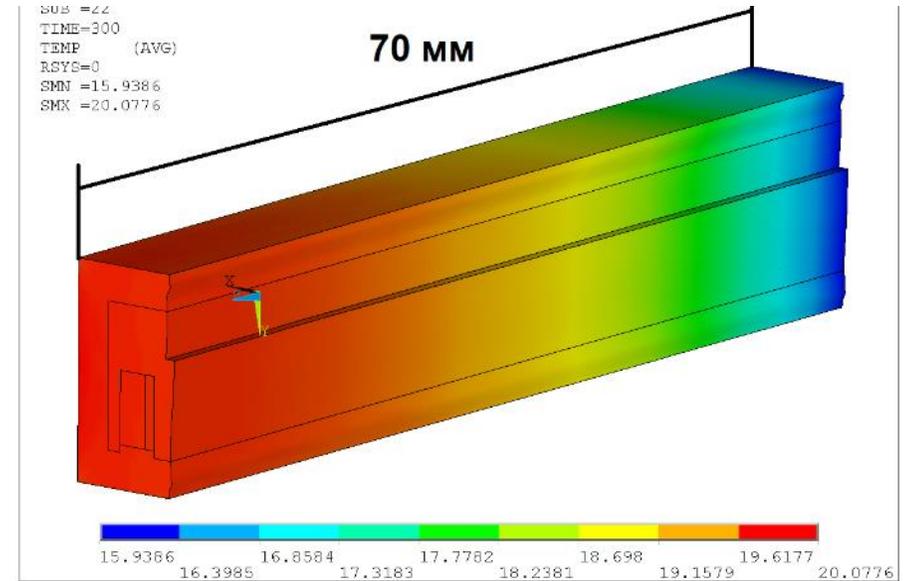
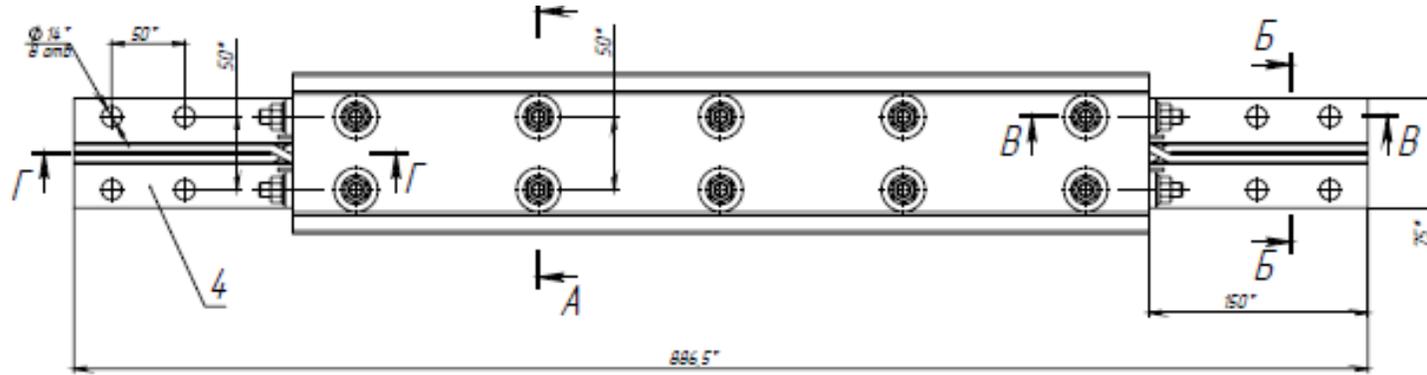
Питание образца - 2 источника (ИСТ-10), максимальный ток 16-18 кА

ОТП- СП- 469: Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 для электромагнитных систем нового поколения



НИИЭФА
РОСАТОМ

Образец для испытаний на стенде ЛИС-12



Образец термоизолирован - помещен в текстолитовый корпус
внутри корпуса установлен нагреватель
Температура 20K устанавливается после 5 мин работы нагревателя



Что должны показать образцы при испытаниях на стенде ЛИС-12

Требования ТЗ

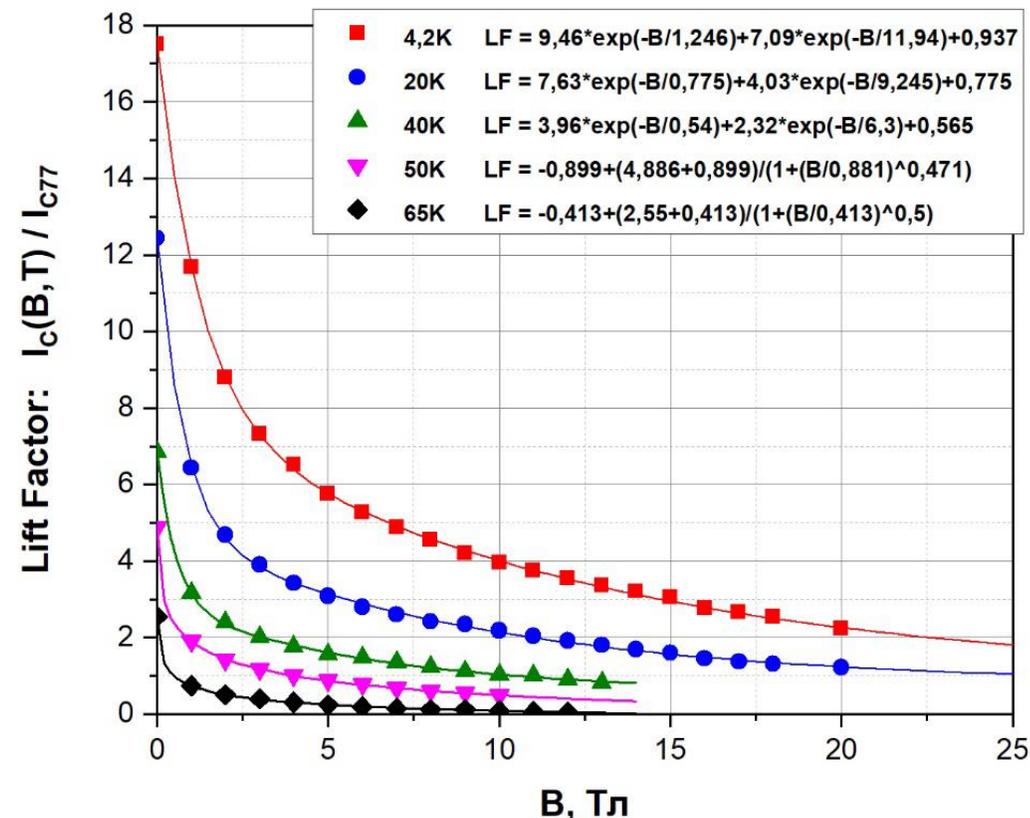
Критический ток образца, кА		
Температура, К	4,2	20
Магнитное поле, Тл		
20	5/8	2,6/4,2
16		3,6/ 5,7

Скейлинг к условиям эксперимента

Критический ток образца, кА		
Температура, К	4,2	20
Магнитное поле, Тл		
8	11,4/18,0	5,76/9,1
7	12,0/19,0	6,3/10,0
5	14,4/22,8	7,2/11,4

Скейлинг к условиям эксперимента

Температура, К	T=77 К	
Магнитное поле, Тл		
0	2,4/3,8	

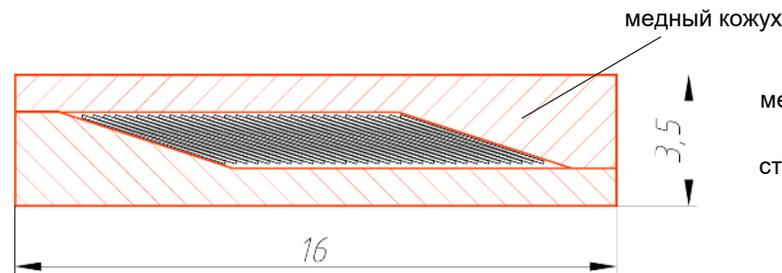




ОТП- СП- 469: Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 для электромагнитных систем нового поколения

разработаны и изготовлены макеты трех типов ВТСП-2 проводов

ВТСП-2 лента, 4 мм, 35 шт

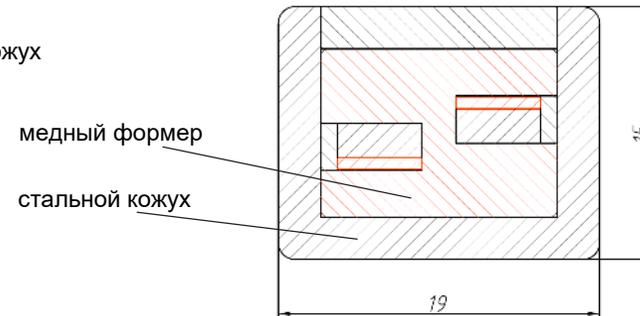


ВТСП-2 провод типа «Столпка ВТСП-2 лент в кожухе»



ВТСП-2 провод типа «Столпка ВТСП-2 лент в кожухе»

ВТСП-2 лента, 5 мм, (2×10) шт

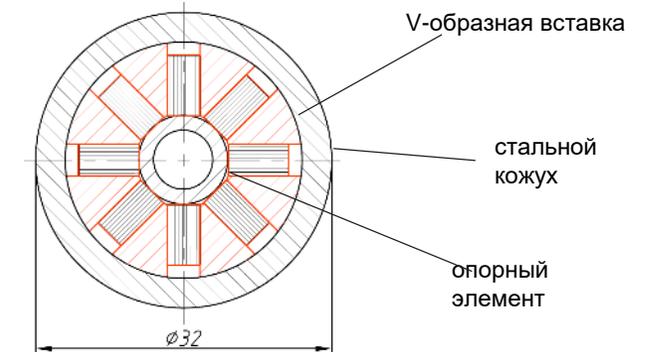


ВТСП-2 провод типа MiST



ВТСП-2 провод типа MiST

ВТСП-2 лента, 4 мм, (8×5) шт



ВТСП-2 провод типа VSS



ВТСП-2 провод типа VSS

ОТП- СП- 469: *Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 для электромагнитных систем нового поколения*

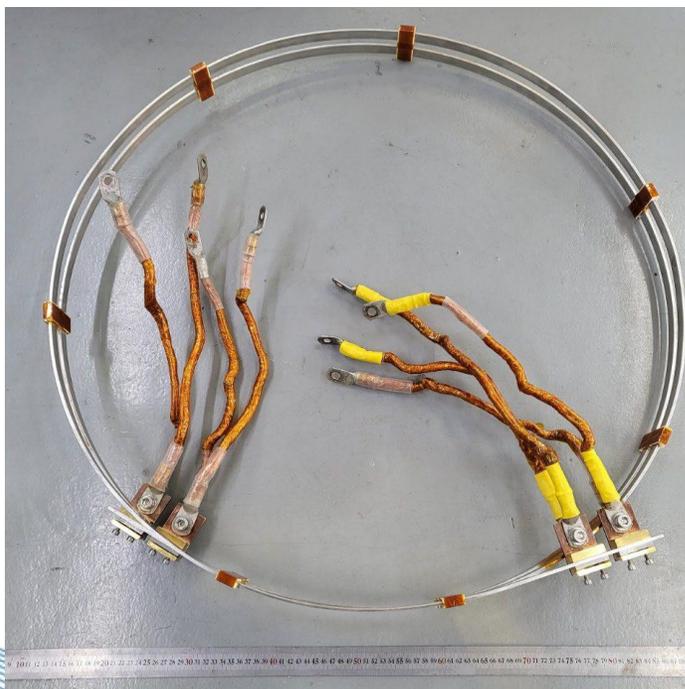
разработаны и изготовлены макеты трех типов ВТСП-2 проводов



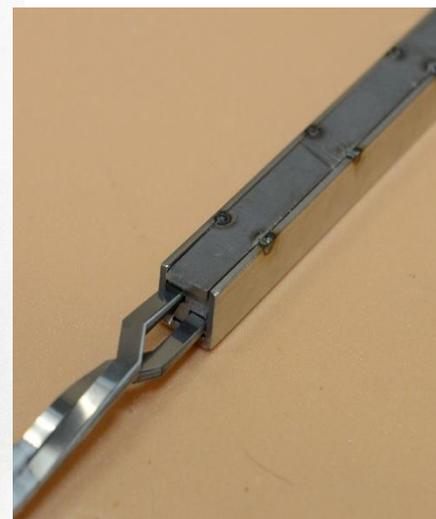
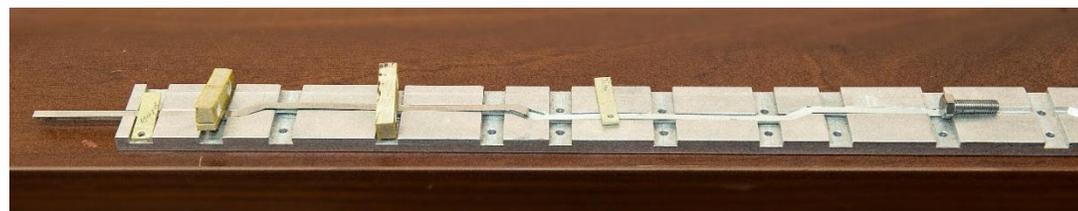
НИИЭФА
РОСАТОМ

ВТСП-2 провод типа «Столпа ВТСП-2 лент в коже»

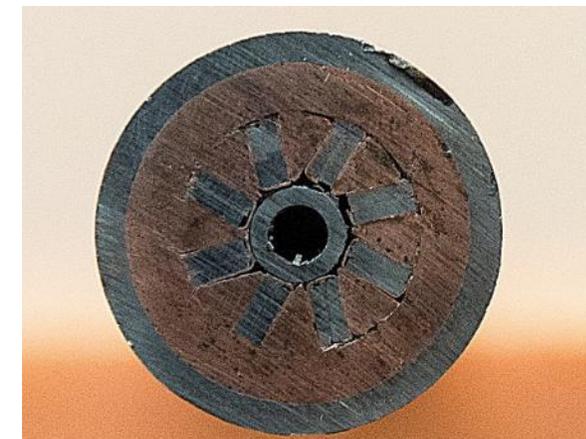
На фото обмотка диаметром 800 мм
Расчетный минимальный диаметр изгиба -250мм



ВТСП-2 провод типа MiST



ВТСП-2 провод типа VSS



На фото обмотка диаметром 1500 мм

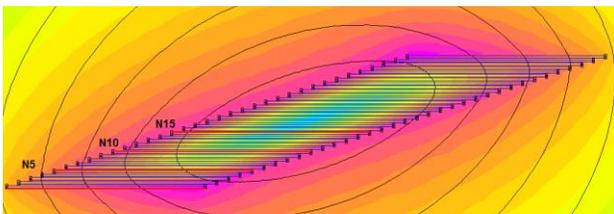


ОТП- СП- 469: Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 для электромагнитных систем нового поколения



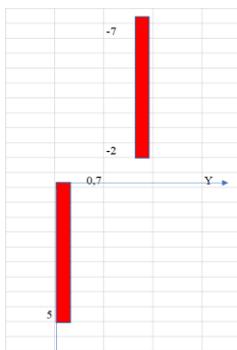
НИИЭФА
РОСАТОМ

Испытания макетов ВТСП-2 проводов в азоте

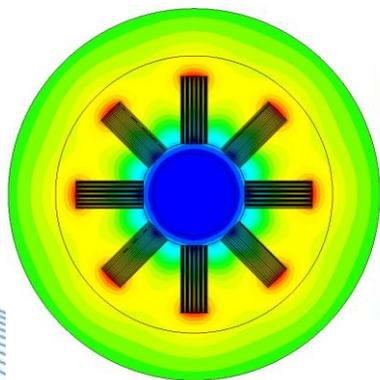
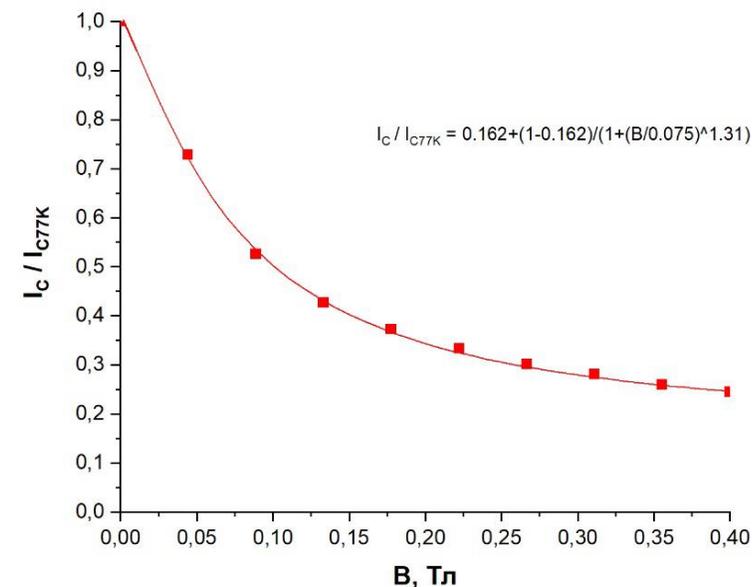


Собственное магнитное поле стопки при $I_{op} \sim 2-3$ кА имеет пики на краю стопки $\sim 0,1-0,2$ Тл

Оценка лифт-фактора для провода «стопка в кожухе» $\sim 0,44$
Для проводов VSS и MiST $\sim 0,5 - 0,6$



Тип провода	«стопка в кожухе»	MiST	VSS
Число лент (n)	35	20	40
$I_c \times n$	5950	3400	6400
Тест (короткий прямой образец)	2850	1870	3500
Лифт-фактор	0,496	0,55	0,53
Тест (образец 5 м- 2-х витковая катушка)	2950 (800мм)	1940 (900мм)	3400 (1500мм)



Тест 5-м макетов провода после приложения деформации изгиба не выявил явных признаков деградации: результаты измерений – в пределах разброса характеристик образцов

ОТП- СП- 469: Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 для электромагнитных систем нового поколения



НИИЭФА
РОСАТОМ

Испытания макетов ВТСП–2 проводов в ЛИС-12

ВТСП–2 провод типа «Стопка ВТСП–2 лент в кожухе»

Проведено 15 тестов (в рамках текущих возможностей стенда ЛИС-12)* включая циклическое заведение тока со скоростью 500А/с

наихудшее сочетание параметров: – магнитное поле -7Тл, температура- 18К и рабочий ток – 7800 А, не привело к демонстрации образцом каких-либо признаков начала перехода образца в нормальное состояние

ВТСП–2 провод типа MiST

Проведено 10 тестов (в рамках текущих возможностей стенда ЛИС-12)

наихудшее сочетание параметров: – магнитное поле -7Тл, температура- 18К и рабочий ток – 6000 А, не привело к демонстрации образцом каких-либо признаков начала перехода образца в нормальное состояние

Результаты испытаний токонесущей способности макетов (0.5 м), полученные скейлингом результатов испытаний в гелии				Соответствие ТЗ
Тип провода	Магнитное поле, Тл	Критический ток образца (не хуже чем) , кА		
		Температура, К		
		4,2	20	
Стопка в кожухе (35 ВТСП-2 лент)	5	16,9	8,5	✓
	8	13,5	6,8	
	20	5,7	3,1	
MIST (20 ВТСП-2 лент)	5	10,9	5,5	✓ следует увеличить кол-во лент в стопке
	8	8,7	4,4	
	20	3,8	2,1	

По результатам испытаний образцов в гелии получены оценки, представленные в таблице

* Сбой в работе одного из источников питания ограничивал возможности стенда

ОТП- СП- 469: Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 для электромагнитных систем нового поколения



НИИЭФА
РОСАТОМ

Выводы

- **В достаточно сжатые сроки были разработаны, изготовлены и испытаны макеты трех типов обмоточных ВТСП-2 проводов класса 20Тл, 20К, 5-8 кА**
- **Образцы показали работоспособность и достигли расчетных характеристик при испытании в жидком азоте**
- **Результаты исследования 2-х образцов при температуре 4,2-20К дают основания предполагать, что заявленные характеристики при 16-20 Тл будут достигнуты**
- **Исследования образцов будут продолжены в 2023г, параллельно с разработкой провода класса 20Тл, 20К, 50-80 кА**

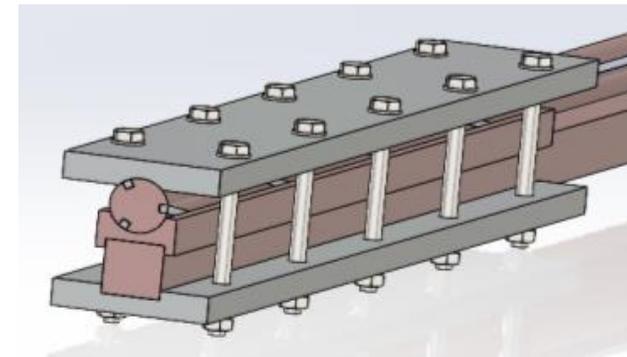
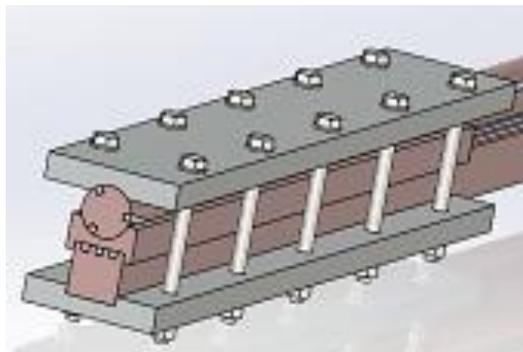
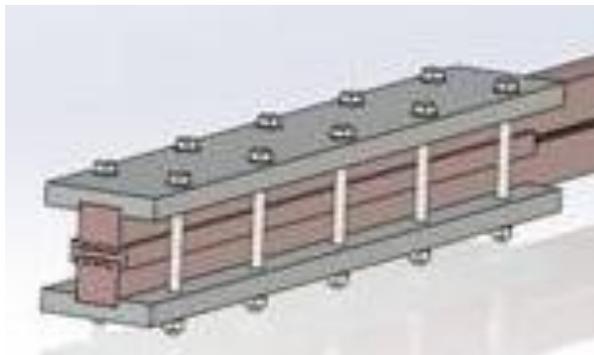
ОТП- СП- 469: Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 для электромагнитных систем нового поколения



НИИЭФА
РОСАТОМ

Важные проекты, которые должны идти параллельно

Проект: Разработка, изготовление и испытание опытных образцов контактного соединения обмоточного провода высокополевой ВТСП магнитной катушки



1. Образец межгалетного КС высокополевой ВТСП магнитной катушки
2. Образец КС типа «обмотка - ВТСП шина» высокополевой ВТСП магнитной катушки
3. Образец КС типа «ВТСП шина – токовый ввод» высокополевой ВТСП магнитной катушки

Strategy for Developing the EU-DEMO Magnet System in the Concept Design Phase

V. Corato , P. Bruzzone , N. Bykovskiy , G. Celentano , A. della Corte , *Senior Member, IEEE*, F. Demattè , S. Fink, W.H. Fietz , *Senior Member, IEEE*, L. Muzzi , *Senior Member, IEEE*, X. Sarasola , K. Sedlak , A. Torre , L. Zani, and G. Federici

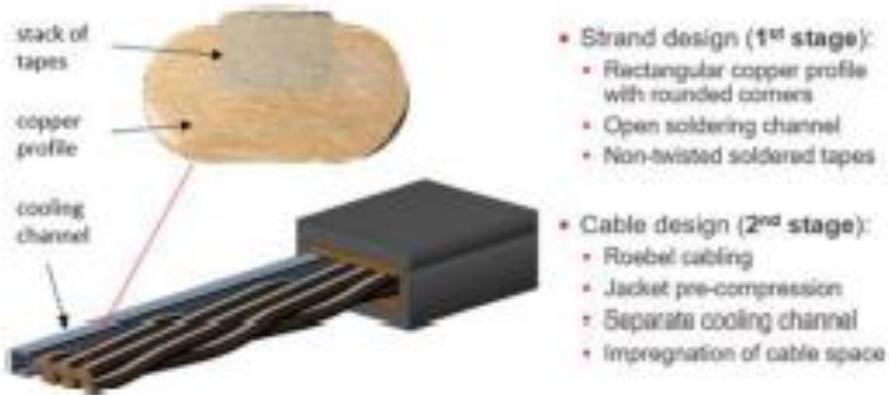


Fig. 4. ASTRA conductor layout for DEMO CS.

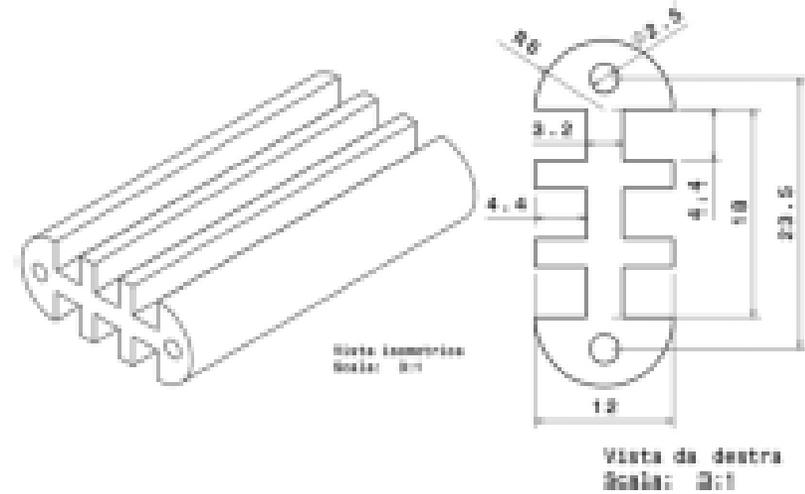


Fig. 6. Layout of a flat cable. HTS stacks are allocated within slots created in the Al-core. In this configuration 6 HTS stacks composed of 20 tapes are disposed within the slots. The direction of the external applied magnetic field is always parallel to the tape surface.

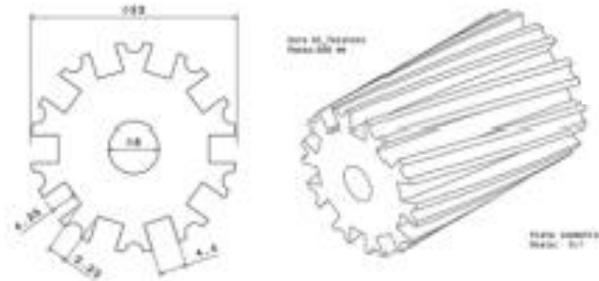


Fig. 5. Sketch of ten-slot Al-core. Slots are designed for the accommodation of 20 or 30 tape stacks depending on the tape thickness. In this version, for advanced cooling capability, additional pressure relief ducts are created in the external circumference of the core.



НИИЭФА
РОСАТОМ

**Спасибо
за внимание**