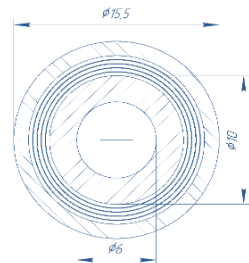
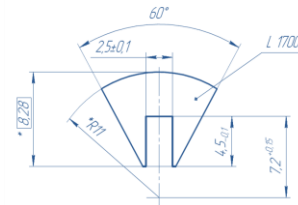
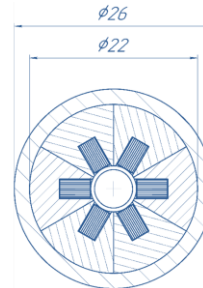
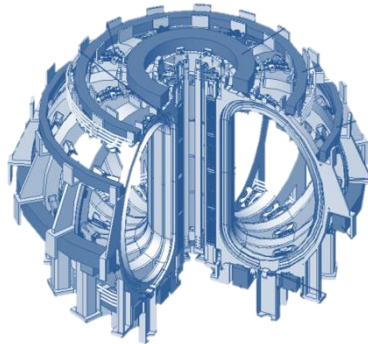
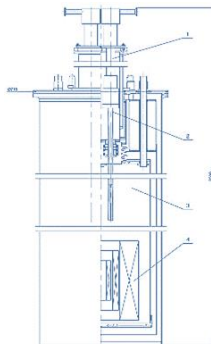
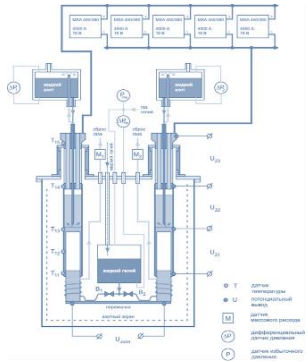




# Результаты предварительных испытаний токонесущих элементов для электромагнитной системы токамака ТРТ. Альтернативные методы создания обмоток ВТСП электромагнитных систем для УТС

С.В.Шавкин, М.И.Сурин, Д.Н.Диев, А.В.Поляков, В.В.Гурьев, А.В.Кривых,  
А.В.Наумов, В.И.Щербаков, Д.И.Шутова  
НИЦ «Курчатовский институт»



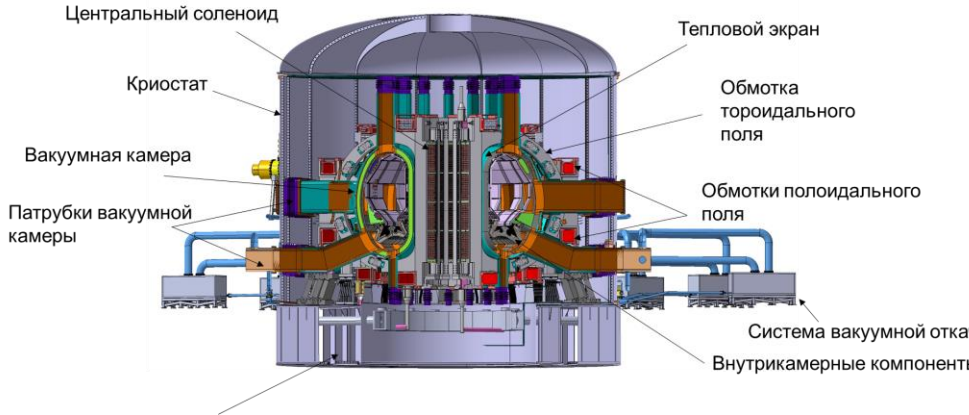


# **Проектные решения электромагнитной системы токамака ТРТ (ТРТ-2021/2022)\***

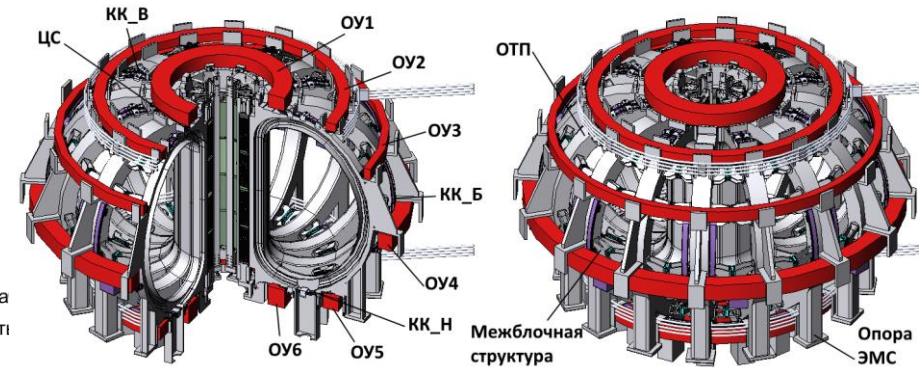
*\*По материалам докладов: И.Ю.Родин, Э.Н. Бондарчук, Е.Р. Запретилина  
Секция «ИТВ УТС» НТС № 6 ГК «Росатом», Звенигород, 23 – 25 марта 2022 г.*



## Компоновка ТРТ



## Электромагнитная система ТРТ



## Обмотка центрального соленоида



Соленоид центральный  
R<sub>внутр.</sub> = 0,475 м;  
R<sub>наруж.</sub> = 0,726 м;  
I<sub>max</sub> ≈ 60 кА; Общая длина  
проводника 3860 м (4 секции)

## Обмотка тороидального поля



Сечение ОТП  
I<sub>в</sub> = 76,8 кА, N = 70 витков,  
AIW<sub>max</sub> = 5,376 МА,  
R<sub>мин</sub> = 0,6 м; Общая длина  
проводника 16 800 м (16  
секций)



**Обмотка тороидального поля (ОТП):**

Индукция магнитного поля на проводе: 15 Тл;

Рабочий ток в ленте : 74 А/мм ширины ленты;

Отношение рабочего тока провода к критическому:

- $J^*_{ор}/J^*_c (T=5K) - 0,6;$
- $J^*_{ор}/J^*_c (T=10K) - 0,7;$
- $J^*_{ор}/J^*_c (T=15K) - 0,82$

Рабочий ток провода: 74кА

Максимальная рабочая температура: 15 К

Рабочая плотность тока: 140 А/мм<sup>2</sup>, что соответствует плотности тока по обмотке для центральной галеты в радиальной пластине % 70 А/мм<sup>2</sup>

**Обмотка индуктора (ОИ)**

Индукция магнитного поля на проводе: 15 Тл;

Рабочий ток в ленте: 60 А/мм ширины ленты;

Отношение рабочего тока провода к критическому:

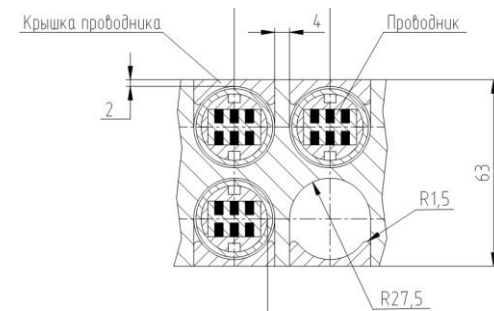
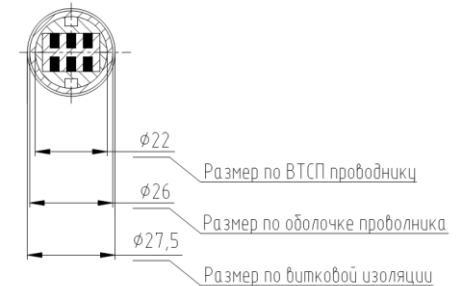
- $J^*_{ор}/J^*_c (T=5K) - 0,5;$
- $J^*_{ор}/J^*_c (T=10K) - 0,6;$
- $J^*_{ор}/J^*_c (T=20K) - 0,8.$

Рабочий ток провода – 60кА

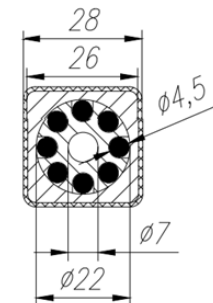
Максимальная рабочая температура – 20К;

Рабочая плотность тока по проводу без изоляции – 89 А/мм<sup>2</sup>.

Токонесущий элемент обмотки тороидального поля (ОТП)



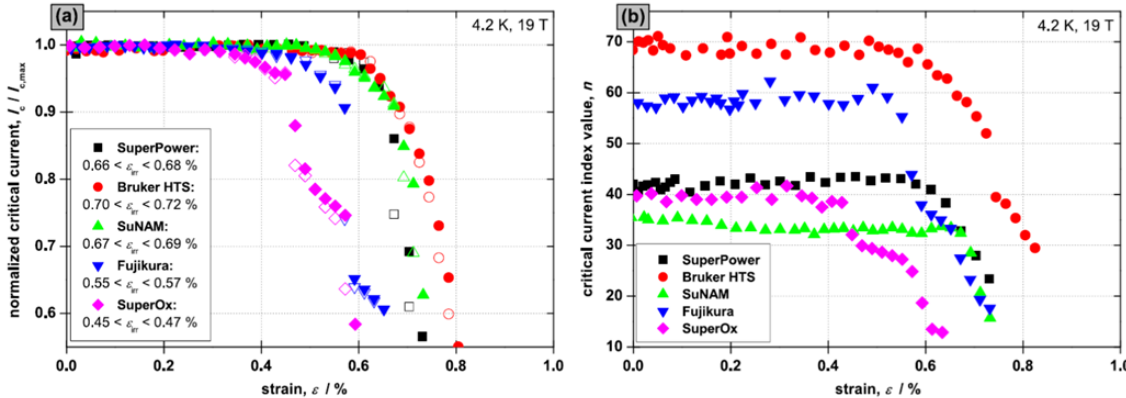
Токонесущий элемент обмотки индуктора (ОИ)



**Расчет минимального числа ВТСП лент в токонесущих элементах:**

- 1) ТНЭ для ОТП:  $I_{раб}=296 \text{ A}/4\text{мм}; N=77000\text{A}/296=260 \text{ шт.}$   
(ВТСП лента шириной 4 мм)
- 2) ТНЭ для ОИ:  $I_{раб}=240 \text{ A}/4\text{мм}; N=60000\text{A}/296=250 \text{ шт.}$   
(ВТСП лента шириной 4 мм)

## Электромеханические характеристики ВТСП проводов



### Расчет «безопасной» деформации ВТСП ленты при изготовлении обмоток (при изгибе ТНЭ\*, см. сноску):

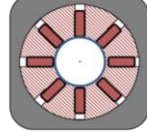
- 1) ОТП:  $R_{мин} = 0,6$  м, расстояние ВТСП ленты от нейтральной оси ТНЭ (без деформации изгиба):  $h = R_{мин} * \epsilon = 600 \text{ мм} * 0,4\% = 2,4 \text{ мм}$   
**Наиболее близкий вариант: PaST (см. внизу).**  
**Стоит рассмотреть ТНЭ прямоугольного сечения!**
- 1) ОИ:  $R_{мин} = 0,475$  м, расстояние ВТСП ленты от нейтральной (без деформации изгиба) оси ТНЭ:  $h = R_{мин} * \epsilon = 475 \text{ мм} * 0,4\% = 1,9 \text{ мм}$



MiST  
Meanders in Structure,  
Transposed



PaST  
Parallel Stacked  
Tapes



VSS  
V-Shape with  
Stacks

ВТСП версия  
6 CORC around one  
TF 60-70 кА



\*При использовании монолитных ТНЭ без внутренней компенсации

При использовании CORC-подобных ТНЭ вопрос требует дополнительной оценки

В обмотках деформации растяжения в ВТСП слое проводах не должны превышать 0,4%

На сжатие - необходимо обеспечить устойчивость к поперечному сминанию и деламинации



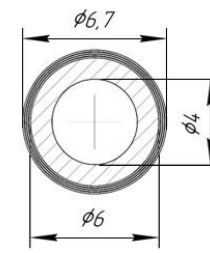
# **Результаты испытания ТНЭ для ЭМС ТРТ после изгибающих деформаций**



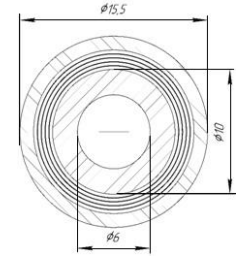
- ✓ В 2021-2022 годах разработаны, изготовлены и испытаны первые макетные образцы ВТСП ТНЭ (5 типов, 6 шт.)

Проведены приемочные испытания образцов в жидком азоте, в открытом криостате, с использованием программируемых стабилизированных источников тока (производство США) до 20 кА. Оборудование полностью закрывает диапазон испытаний при азотных температурах.

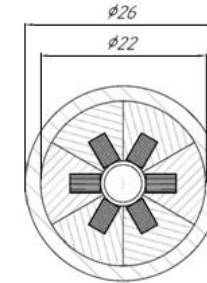
- ✓ Измерен критический ток в собственном магнитном поле.
- ✓ Проведено сравнение экспериментальных и расчетных результатов.
- ✓ Испытания показали, что в целом технология изготовления образцов выдержана правильно.



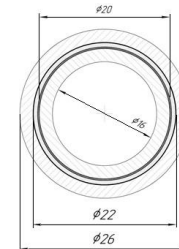
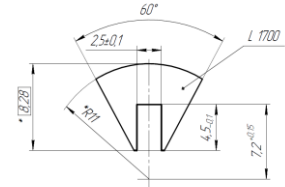
Сечение макетного образца Тип 1



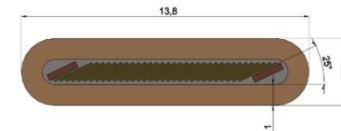
Сечение макетного образца Тип 2



Макетный образец Тип 3



Сечение макетного образца Тип 4



Сечение ВТСП макетного образца Тип 5

В 2022 году запланировано изготовление 2 конструкций ВТСП ТНЭ: для ОТП и для ЦС. Конструкция и параметры ТНЭ обсуждены с соисполнителем работ.



- ✓ Проведены токовые испытания ТНЭ после деформации, имитирующей процесс изготовления обмотки ТРТ



Последовательный изгиб на трехроликовом трубогибном станке



«Тонкий» CORC (Тип 1),  
изогнутый на оправке  
 $\varnothing$  200 мм



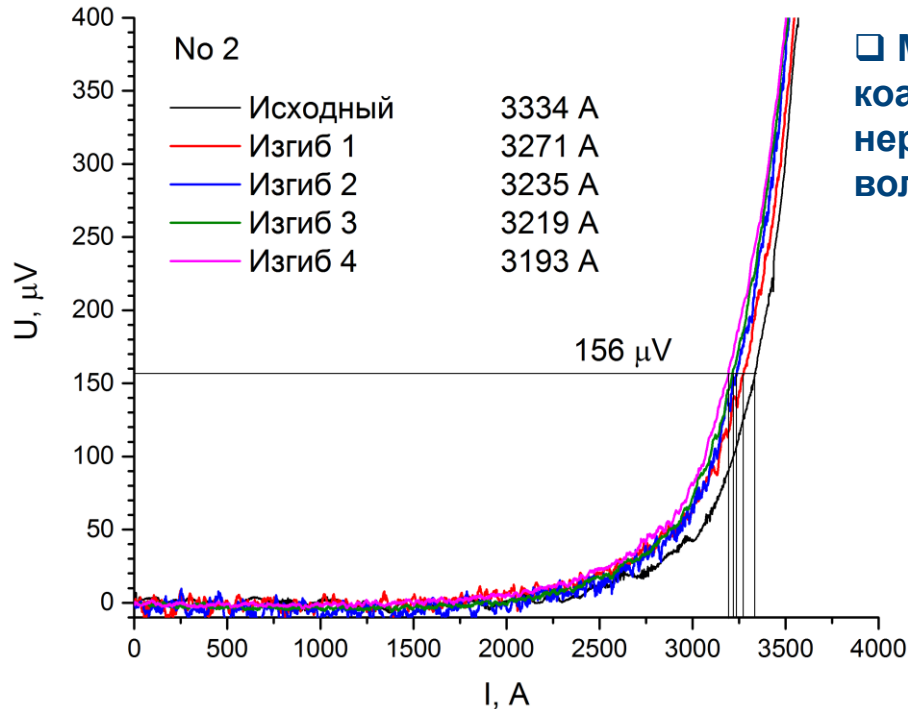
Криостат с ТНЭ во время испытаний

- Для испытаний образцов ТНЭ на разных диаметрах изгиба изготовлена оснастка для изгиба, открытый гибкий криостат, оснастка для подключения к источникам тока.

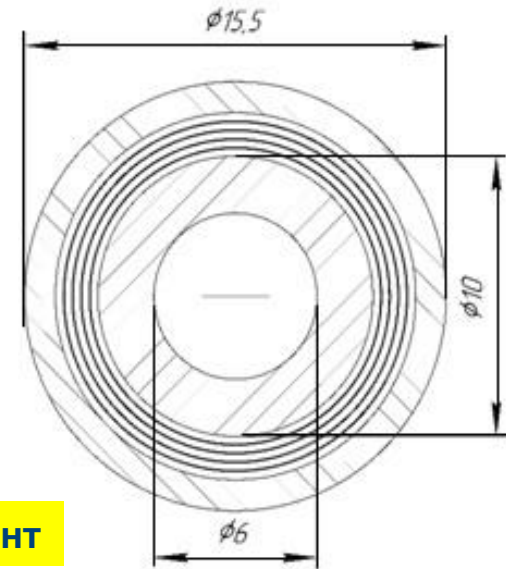




Образец №2, «Тонкий CORC в нержавеющей оболочке»



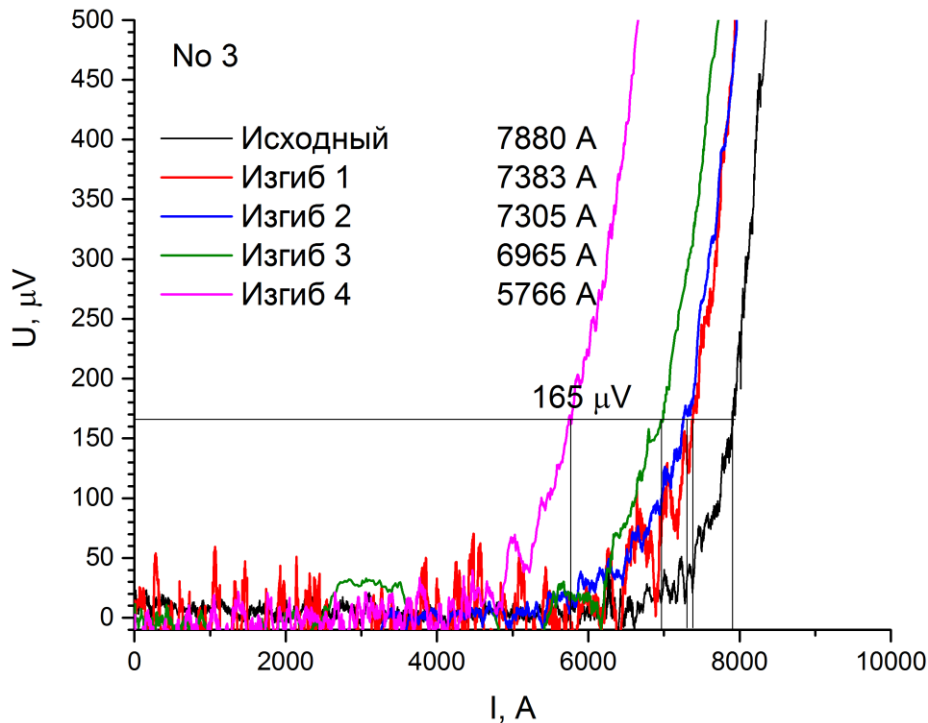
□ Макетный образец ВТСП токонесущего элемента коаксиальной конструкции с оболочкой из нержавеющей стали, прокомпактированный методом волочения (Тип 2)



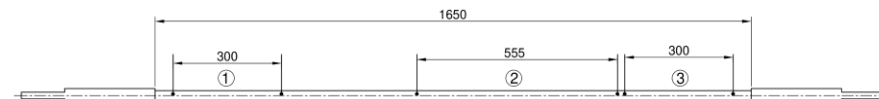
28 шт. ВТСП лент

№, п/п	Диаметр изгиба, мм	Критический ток на полной длине образца, А	Инженерная плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	Деградация по току на полной длине, %	Деградация по току, пересчитанная на длину деформации, %
1	-	3334	17,45	0	0
2	~2000	3271	17,12	1,88	8,52
3	~1200	3235	16,93	2,97	10,02
4	~900	3219	16,85	3,45	13,77
5	~500	3193	16,71	4,23	17,52

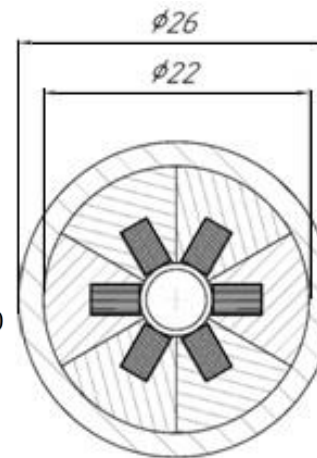
Образец №3, «V-шейп»



Контрольное измерение:



№ участка	Полная длина	1	2	3
Критический ток, А	6064	7318	5688	7196
Дegradация относительно тока прямого образца, %	23,05	7,13	27,82	8,68

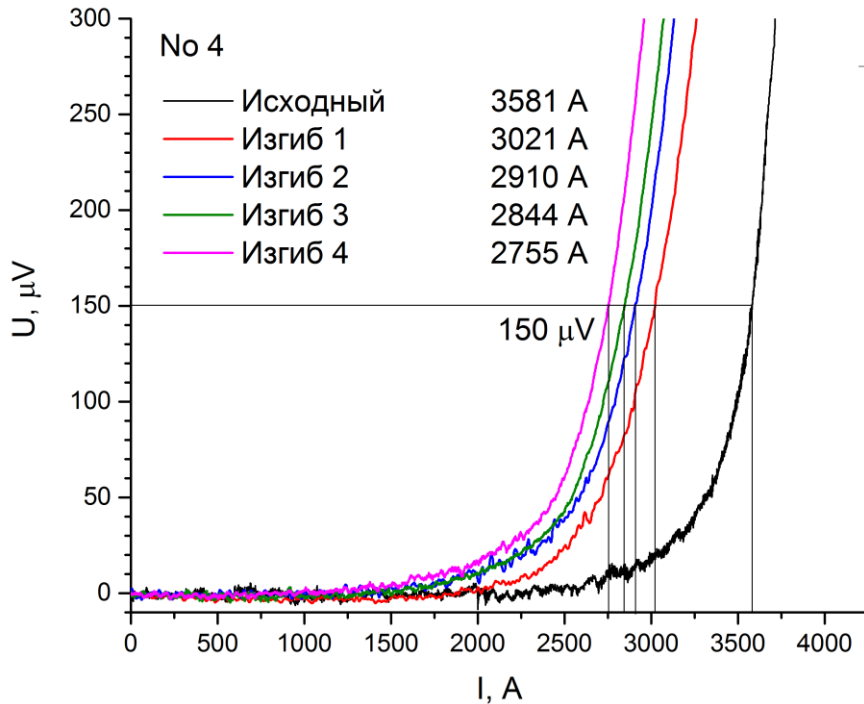


□ Макетный образец ВТСП токонесущего элемента, изготовленный в виде стопок лент с оболочкой из нержавеющей стали, прокомпактированный методом прокатки (Тип 3)

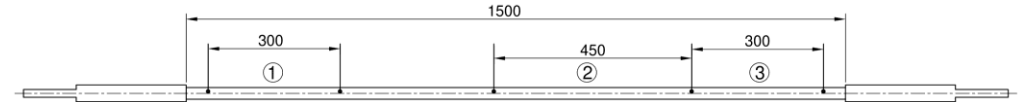
120 шт. ВТСП лент

№, п/п	Диаметр изгиба, мм	Критический ток на полной длине образца, А	Инженерная плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	Дegradация по току, %	Дegradация по току, пересчитанная на длину деформации, %
1	-	7880	14,29	0	0
2	~3000	7383	13,39	6,31	7,99
3	~1900	7305	13,25	7,30	14,34
4	~1500	6965	12,63	11,61	18,78
5	~900	5766	10,46	26,83	32,74

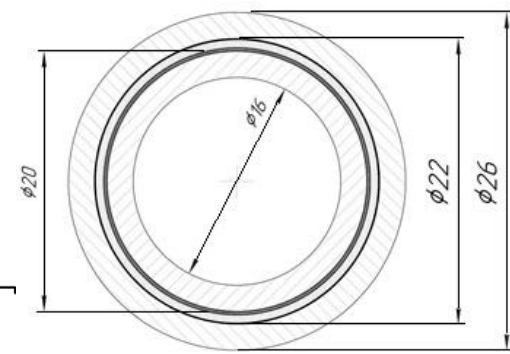
Образец №4, «Толстый CORC»



Контрольное измерение:



№ участка	Полная длина	1	2	3
Критический ток, А	2051	2364	1898	1904
Деградация относительно тока прямого образца, %	42,73	33,98	47,00	46,83



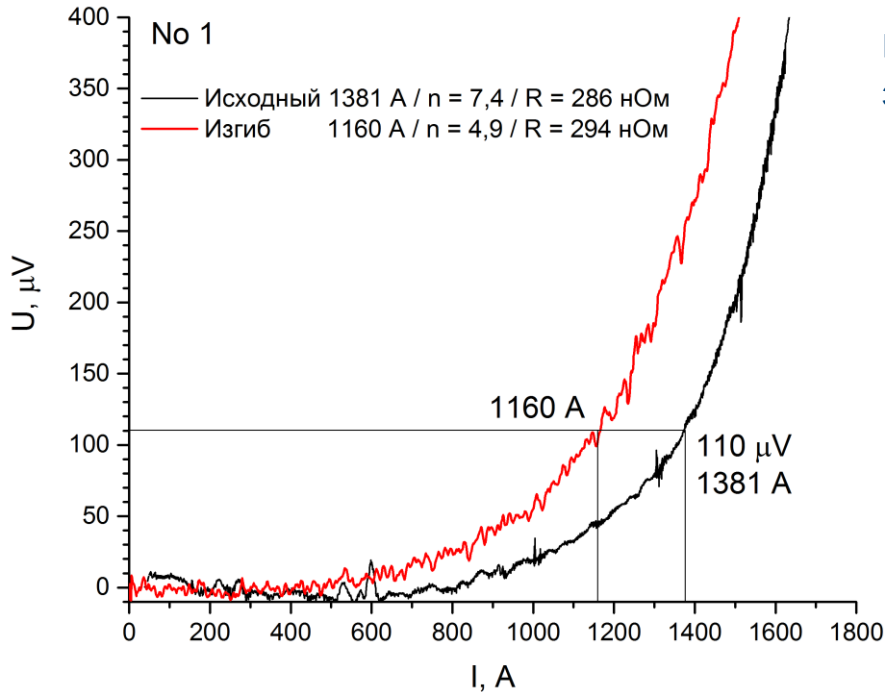
Макетный образец токнесущего элемента коаксиальной конструкции с оболочкой из нержавеющей стали, прокомпактированный методом прокатки (Тип 4)

39 шт. ВТСП лент

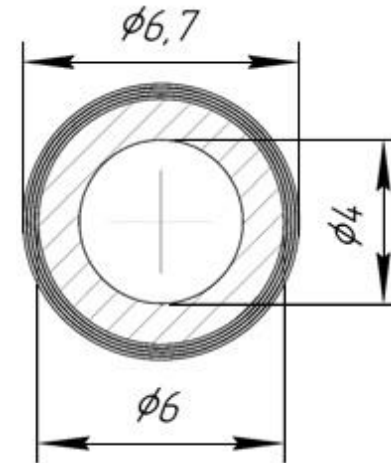
№, п/п	Диаметр изгиба, мм	Критический ток на полной длине образца, А	Инженерная плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	Деградация по току, %	Деградация по току, пересчитанная на длину деформации, %
1	-	3581	6,50	0	0
2	~2000	3021	5,48	15,64	27,95
3	~1200	2910	5,28	18,73	31,58
4	~900	2844	5,16	20,58	32,98
5	~500	2755	5,00	23,07	35,77

Образец деградировал по пока не выясненным обстоятельствам. Никаких операций во время и между измерениями не проводилось. Промежуток между измерениями ~2 месяца

Образец №1, «Тонкий CORC»



□ Макетный образец ВТСП токонесущего элемента коаксиальной конструкции (Тип 1)

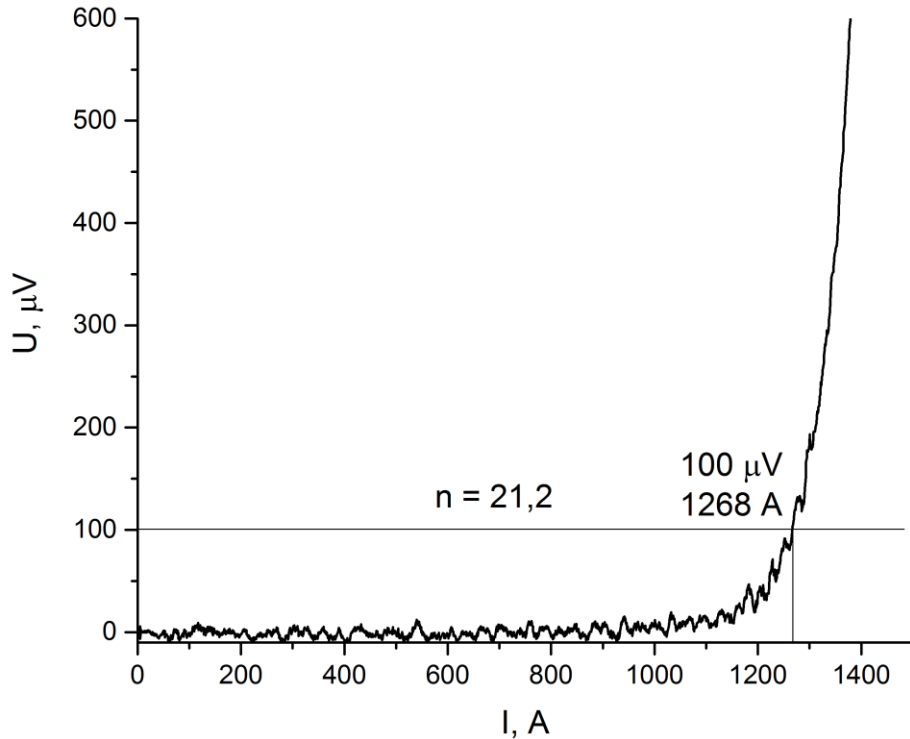


20 шт. ВТСП лент

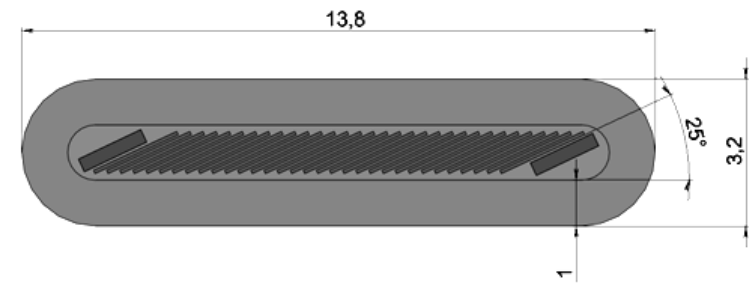
№, п/п	Диаметр изгиба, мм	Критический ток на полной длине образца, А	Инженерная плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	Деградация по току, %	Деградация по току, пересчитанная на длину деформации, %
1	-	1381	39,20	0	0
2	200	1160	32,93	16	39,90

➤ Значительная деградация на диаметре 200 мм.

Образец №5 «Плоский ТНЭ»



□ Макетный образец ВТСП токонесущего элемента, изготовленный в виде стопки лент в медной оболочке прямоугольного сечения (Тип 5)



32 шт. ВТСП лент

№, п/п	Диаметр изгиба, мм	Критический ток на полной длине образца, А	Инженерная плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	Деградация по току, %	Деградация по току, пересчитанная на длину деформации, %
1	-	1300	29,44	0	0
2	200	1268	28,71	2,46	7,69

➤ Единственный прототип ТНЭ без значительной деградации (при изгибе на 200 мм)



## Сложности создания ВТСП СМС на основе проводника в оболочке (СІСС):

- Использования материалов с сильно различающимися механическими свойствами (ВТСП-композит, медь, нержавеющая сталь);
- ВТСП – уязвимый к механическим нагрузкам материал (растяжение, сдвиг), при этом при изготовлении СМС предполагаются два передела: изготовление ВТСП ТНЭ и изготовление обмотки;
- Аналогия изготовления обмоток для токамака Т-15: технология отжиг-намотка Nb3Sn – потеря ~ 50 % тока. С учетом этого для токамака ITER принята технология намотка-отжиг: сверхпроводящие свойства формируются в готовой обмотке!;
- Переход в нормальное состояния и защита СМС: низкая скорость распространения нормальной зоны (Hot-Spot), не разработана система защиты от квенча для длинных ТНЭ на основе ВТСП;
- Проблемы компенсации деформаций/механических напряжений.

### Этапы жизненного цикла изготовления и функционирования ЭМС для УТС (ТРТ)



**На каждом этапе происходит только деградация!!  
Свойства ВТСП лент не могут быть восстановлены в готовой обмотке.**



## Выводы и предложения:

- ✓ Увеличение диаметра ТНЭ до полномасштабного приводит к росту деградации при изгибе («толстый» и «тонкий» CORC, V-shape). Вероятное объяснение: превышение уровня деформации в ВТСП слое критического порога в 0,4%!
- ✓ В образце Тип-4 «Толстый CORC» с оболочкой из нержавеющей стали наблюдалась деградация после двух месяцев хранения. Причины будут выясняться.
- ✓ Образец ТНЭ (Тип 5), изготовленный в виде наклонного пакета лент в медной матрице прямоугольного сечения продемонстрировал наименьшую деградацию токонесущей способности при изгибе на  $\varnothing 200$  мм. Такой тип ТНЭ является вероятным кандидатом для изготовления шинопроводов для ТРТ.
- ✓ Необходимо продолжать работу по усовершенствованию конструкции и технологий изготовления образцов ТНЭ. Вероятное направление: конструкции с минимальными растягивающими напряжениями в ВТСП слое.



# **Альтернативный вариант создания обмоток ЭМС ТРТ**

## Сложность защиты СП обмоток с СИСС:

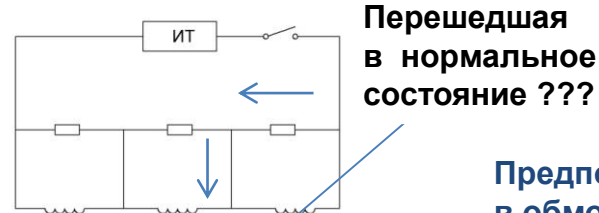
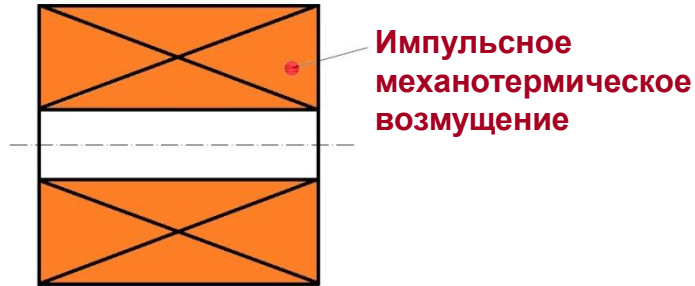


Схема защиты СП обмоток

Предполагаемая длина куска ТНЭ в обмотке ~ 300 м  
Низкая теплоемкость СП обмотки

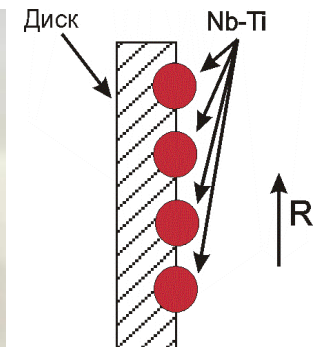
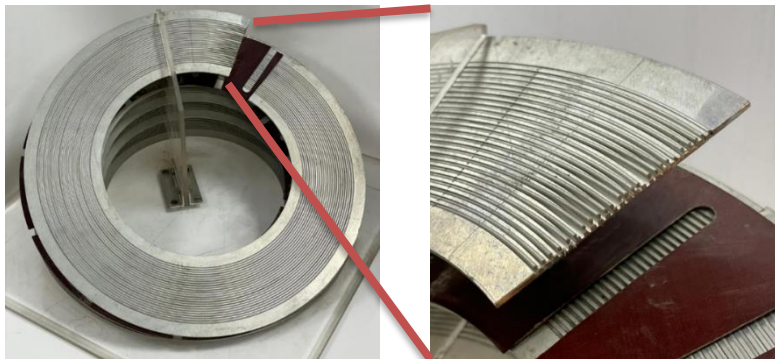
Локальное возмущение не воспринимается всей обмоткой, а приводит к местному, а затем и общему переходу в нормальное состояние.

## Что предлагается:

Изготовить испытательный стенд и макет обмотки с резистивно-соединенными (неизолированными) витками

Опыт: в НИЦ КИ (80-90-е годы) проведен цикл работ по исследованию возможностей создания модельных геликоидальных обмоток для токамака с резистивно-соединенными витками:

- ❖ Кейлин В.Е., Копейкин Н.Ф. и др., ДАН СССР, т. 303 №6, 1988, стр. 1366-1370
- ❖ Кейлин В.Е., Копейкин Н.Ф. и др., IEEE Trans. On MAG-27 №2 pp/ 2284-2287, 1991
- ❖ Кейлин В.Е., Копейкин Н.Ф. и др., Journal of Fusin Energy, v. 11, №1, 1992, pp.1



✓ Есть основания утверждать (патенты US 2020/0211744; WO 2021/195330), что в конструкции SPARC использована конструкция обмоток с резистивно-соединенными витками

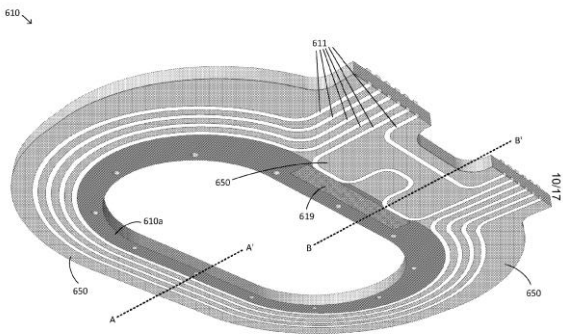
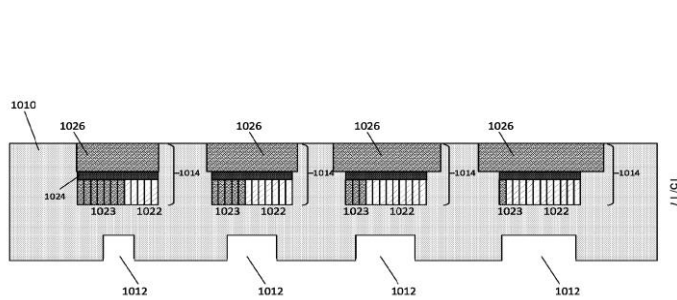
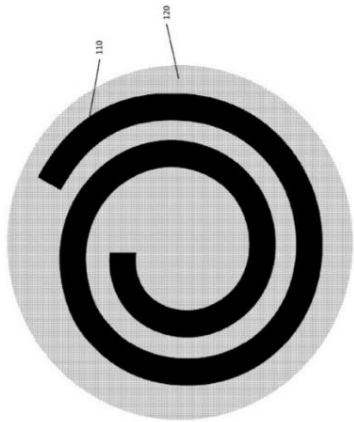


FIG. 7B

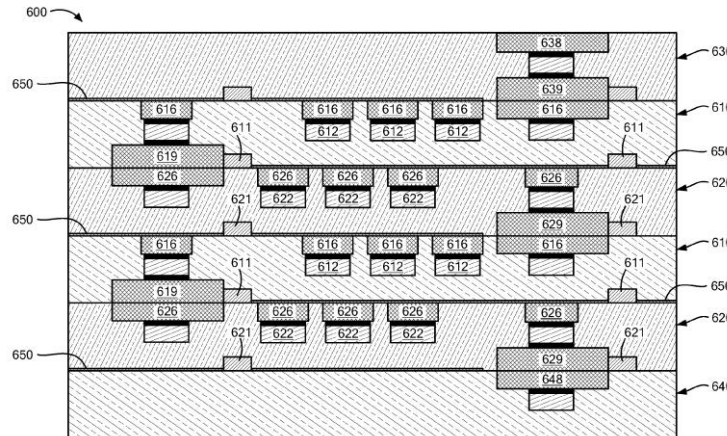
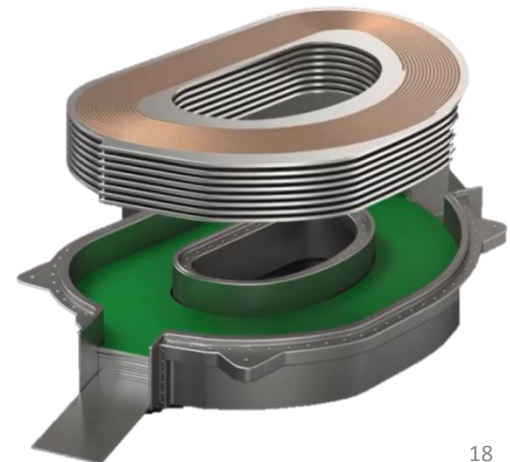
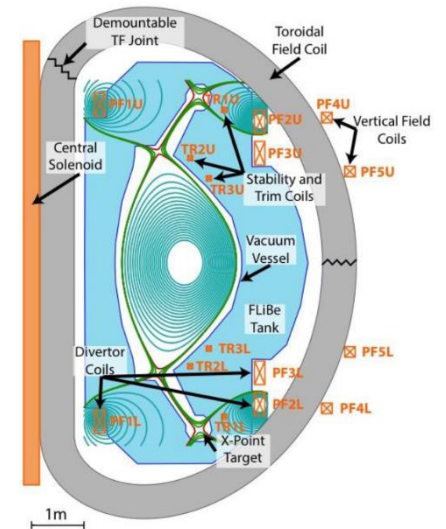
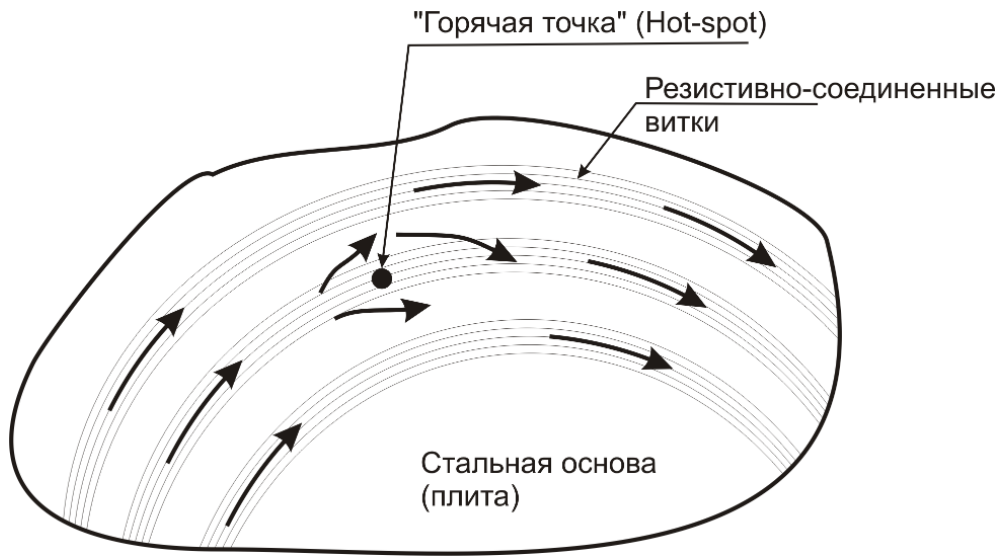


FIG. 6B







**Принцип «самозащиты» обмотки SPARC.  
Достигнутое поле – 20 Тл**

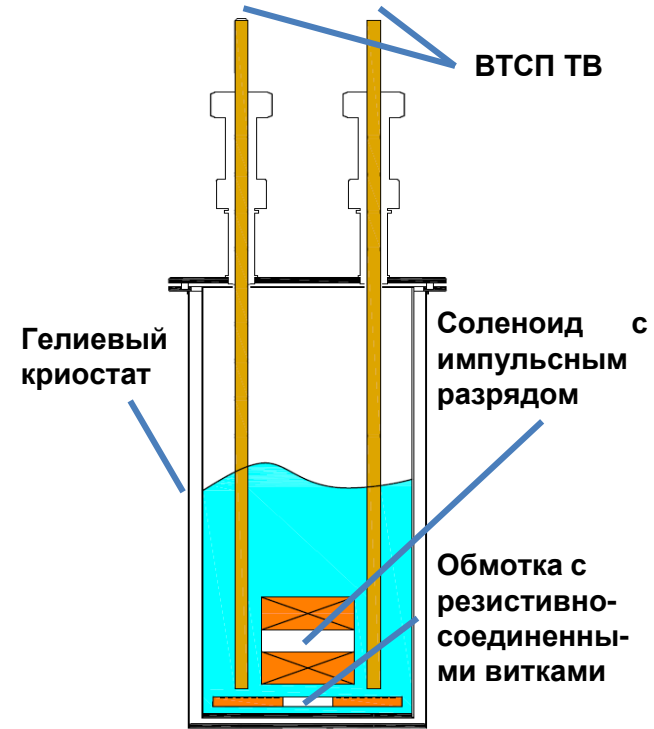
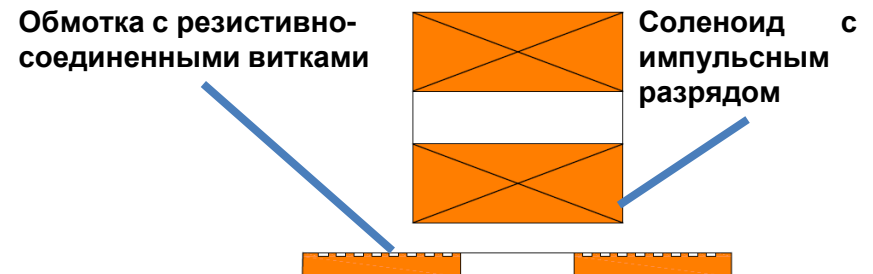
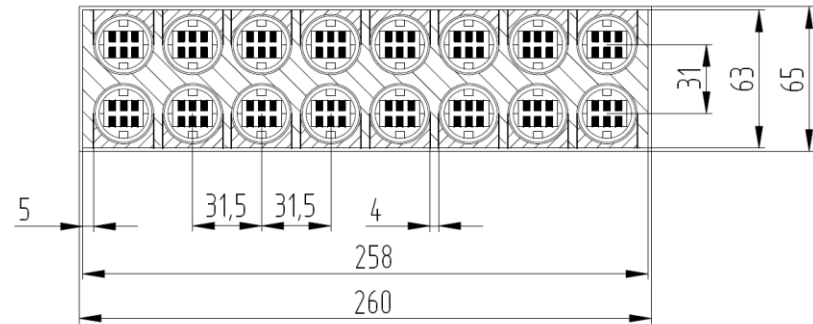
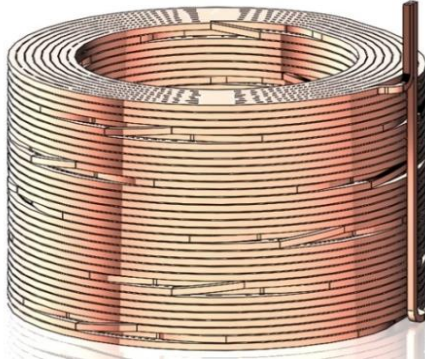


Схема стенда с макетом обмотки



Макет обмотки с соленоидом



**Разрезанная обмотка с одномерным распространением нормальной зоны**

### **Преимущества обмотки с СИСС:**

- ✓ Радиальные схемы увеличивают жесткость и улучшают передачу усилий
- ✓ Более жесткая связь тока с источником и СП обмоткой.

### **Недостатки:**

- Создание ВТСП кабеля (с первым переделом), большой риск повредить изоляцию из-за значительных давлений на границе кабеля и пластины.
- Значительный риск пробоя / перехода из-за отсутствия электрической связи кабеля и пластины.



## Преимущества обмотки с резистивно-соединенными витками для тороидальной обмотки токамака:

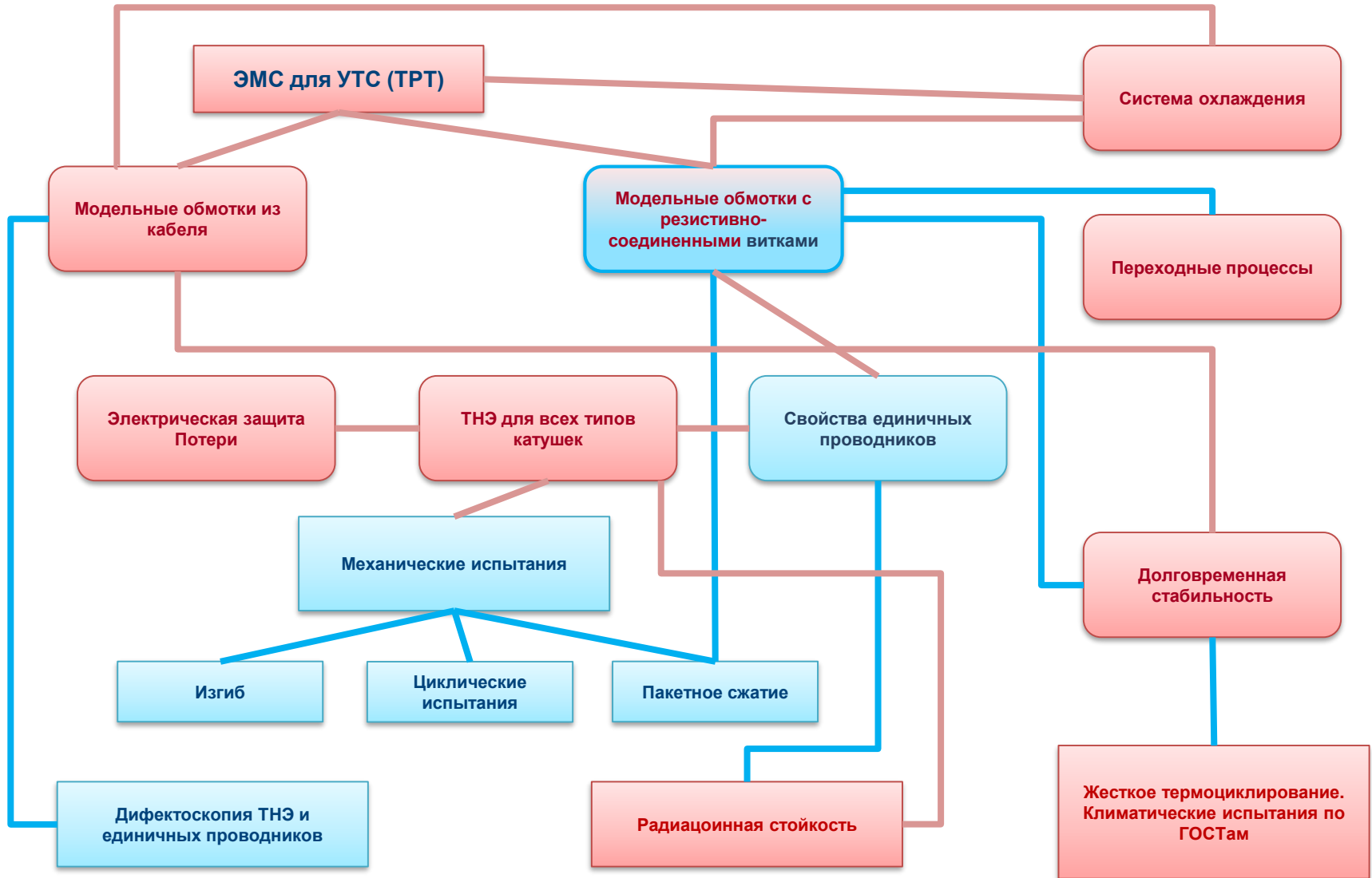
- ✓ Исключается технология создания кабеля ТНЭ (второй передел)
- ✓ Обмотка находится в ненапряженном исходном состоянии
- ✓ Лучшая передача усилий (относительно галетной и слоевой намотки)
- ✓ Самооптимизация плотности тока
- ✓ Более безопасный переход в нормальное состояние – шунтируется всей плитой
- ✓ Ориентация ленты благоприятна для тороидальной обмотки
- ✓ Повышается устойчивость к импульсным возмущениям
- ✓ Достижение высокой плотности тока
- ✓ Экономия материала в сравнении с ВТСП ТНЭ
- ✓ **Вероятность, что так именно и сделано в токамаке SPARC**

## Недостатки:

- Отсутствие транспонирования (требуется провести дополнительные исследования потерь).
- Отсутствие жесткой связи тока обмотки и источника тока.



# **Необходимые дополнительные работы для квалификации ТНЭ обмоток ЭМС ТРТ**



■ Проводимые работы

■ Предстоящие работы





**Для предупреждения ошибок и снижения рисков при проектировании и создании ВТСП электромагнитной системы установки ТРТ НИЦ «Курчатовский институт» предлагает следующие срочные мероприятия:**

- ✓ расширить перечень решаемых задач в рамках НИОКР по разработке и созданию ЭМС ТРТ, включив в работу исследование альтернативных способов изготовления обмоток (включая концепцию резистивно-соединенных пакетов), создание и испытание модельных обмоток (на основе ВТСП ТНЭ типа ССС, и на основе резистивно-соединенных пакетов), а также ряда недостаточно проработанных научно-технических проблем (потери, радиационная стойкость, долговременная стабильность);
- ✓ значительно интенсифицировать и увеличить объем соответствующей НИОКР на 2023 и 2024 гг;
- ✓ проработать вопросы стандартизации ВТСП компонентов для токамака ТРТ;
- ✓ создать рабочую группу на базе НИЦ «Курчатовский институт» для синхронизации и координации работ по разработке, изготовлению и испытаниям опытных образцов ВТСП ТНЭ, с целью своевременного успешного завершения поставленных задач в рамках ФП-3.



# Спасибо за внимание!

