



Summa Technologiae для создания ВТСП магнитов в ЛФВЭ ОИЯИ

Новиков М.С.

Семинар Лаборатории физики высоких энергий
30.05.2025, Дубна





Содержание доклада



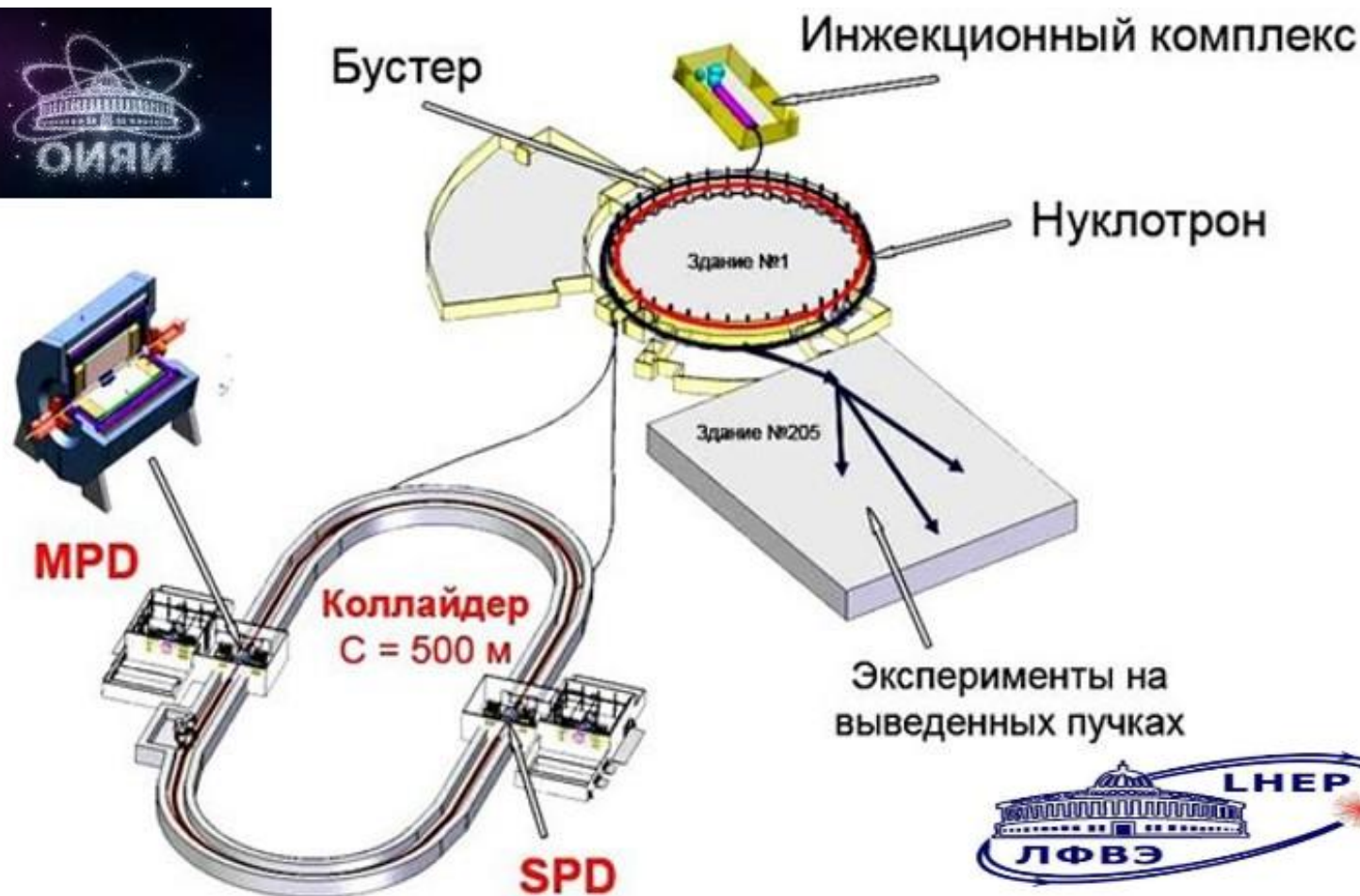
- Обзор задач по прикладной сверхпроводимости в ОИЯИ
- ВТСП задачи ЛФВЭ (НЭОСМТ) – и почему ВТСП (Нуклотрон и SMES)
- ВТСП лента 2-го поколения – конструкция и технология (С-Инновации)
- ВТСП кабель Нуклотронного типа
- Кабельные машины
- и первые магниты из ВТСП кабеля в ОИЯИ
- Радиационный пиннинг ВТСП – эксперименты
- Технология радиационного пиннинга циклотронными ионами
- Перспективы применения сверхпроводниковых технологий ОИЯИ



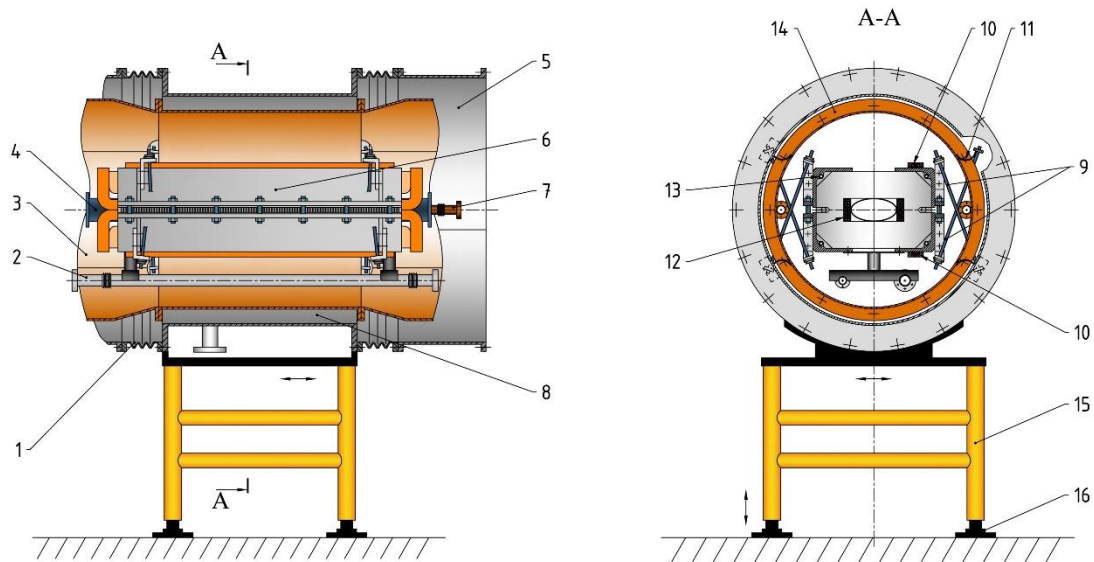
Гамлет Георгиевич Ходжибагиян
1950-2025

Магнитная система NICA и другие проекты

- Бустер NICA
- -диполи 40+1
- -квадруполи 48+1
- -корректоры 32
- Коллайдер NICA
- -диполи 80+1
- -квадруполи 86+1
- -ЛФФ 12
- -магниты св/разв пучков 8
- -мультипольные корректоры 136
- SIS100 (накопитель для FAIR, GSI)
- Модельный магнит коллайдера NIAF в Китае
- Циклотроны, + ЛЯП и ЛЯР, + НИИЭФА, MSC-230

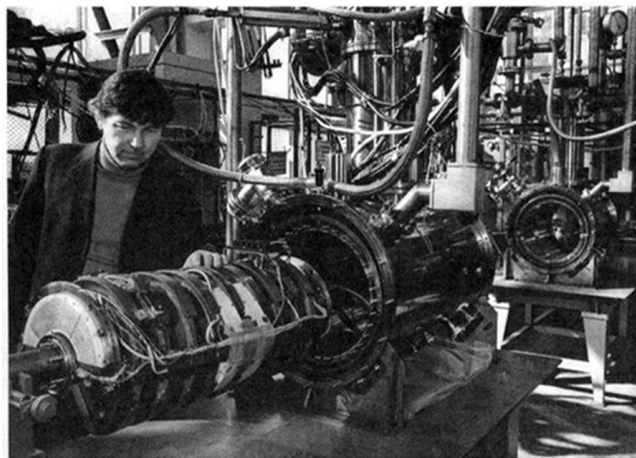


Магнитная система Нуклотрона



Модуль СП магнитной системы Нуклотрона (изображение схематическое).

1 – гибкий элемент; 2 – участок гелиевого коллектора; 3 – разборная часть азотного экрана; 4 – вакуумная камера; 5 – разъемная муфта; 6 – магнит; 7 – трубопровод с жидким азотом; 8 – вакуумный кожух; 9 – тяги; 10 – кабели связи магнитов; 11 – тепловой мост; 12 – обмотка магнита; 13 – трубка охлаждения железного ядра; 14 – азотный экран; 15 – подставка; 16 – регулировка подставки.

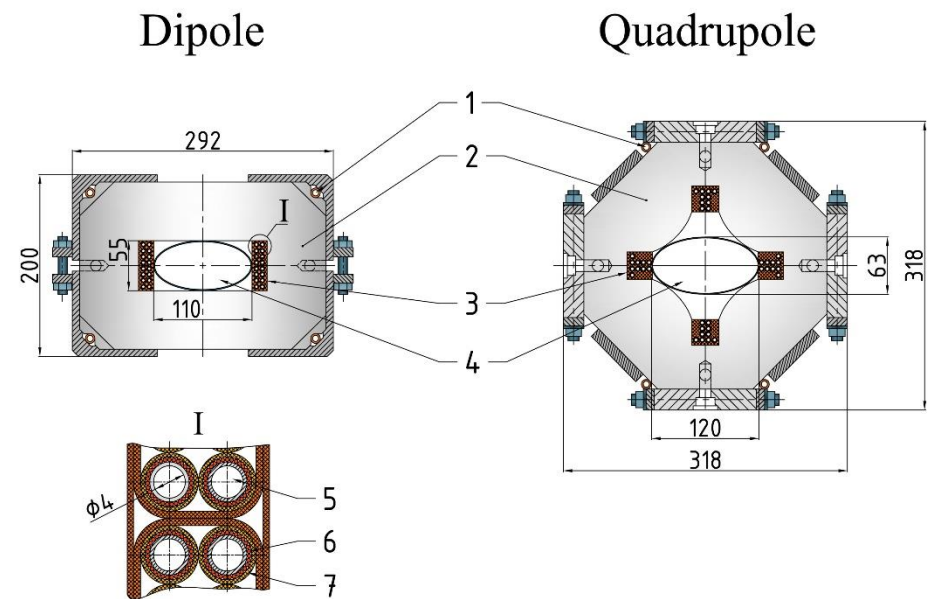


Корпус 203А, 1975 г. Руководитель группы Э. В. Комогоров проверяет сборку магнита РТИ перед монтажом в криостат

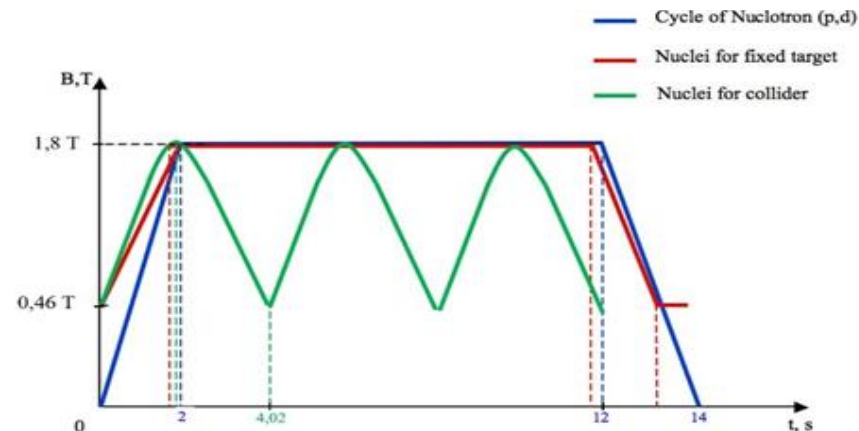


Магнитная система Нуклотрона

- Магниты с ярмом, и обмоткой из полого кабеля
- Дипольные магниты – 96, длина 1.4 м
- Квадрупольные магниты – 64, длина 0.45 м
- Корректоры (стренды на цилиндрах) – 28, 0.3 м
- Охлаждение – принудительное, двухфазный гелий,
- поток распараллелен на несколько обмоток,
- ярмо – основной источник тепловыделения.
- Режим – импульсный, цикл несколько секунд,
- поле до 2 Тл, ток до 6 кА.
- Разработка - с 74 г. по 93 г. (пуск Нуклотрона)
- Эксплуатация - 1993 г. – по н. вр., ~60 сеансов, магнитная система нуждается в замене.
- Планы – замена (4-5 вариантов)... магниты из ВТСП кабеля с отдельным охлаждением обмотки и ярма (жидким азотом) – уже основной

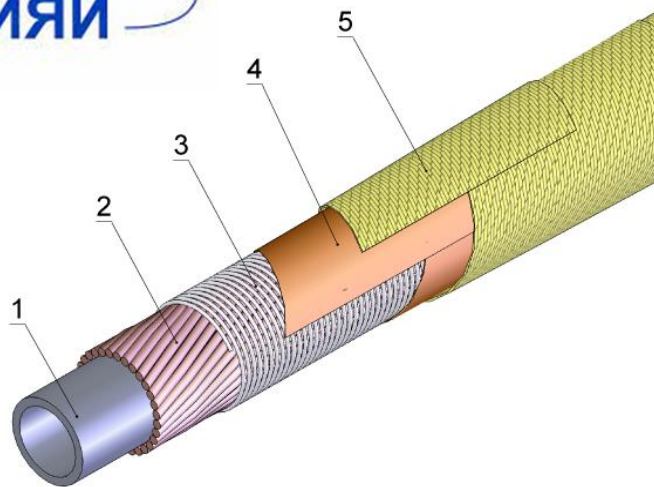


1 – трубка охлаждения железного сердечника; 2 – сердечник магнита;
3 – СП обмотка; 4 – вакуумная камера; 5 – трубка с гелием; 6 – СП-провод;
7 – изоляция.





НТСП кабель Нуклотронного типа

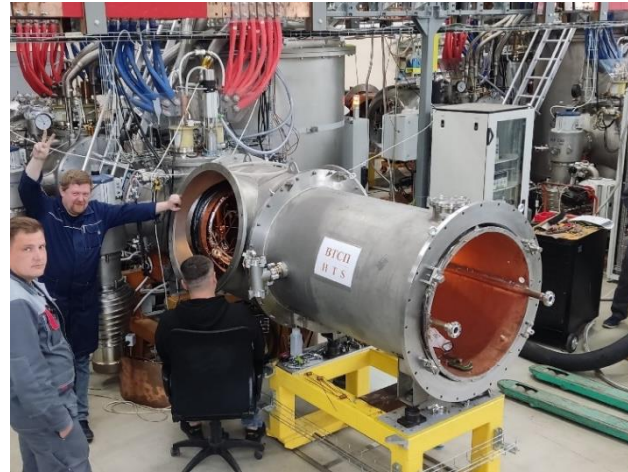


1. Cu-Ni (мельхиор) трубка, 4-6 мм
2. ~30 НТ стрендов
3. Бандаж нихром
4. Лента Каптон (полиимид)
5. Препрег

- Nb-Ti стренды для переменных режимов (1 слой)
- Трубка – канал охлаждения – в контакте с ними
- Применение бандажей – тепловой контакт
- Импрегнирование – тепловой контакт, механическая и динамическая стабильность
- Изоляция – каптон и «пропитанная» стеклоткань
- Компаунды горячего отверждения
- Намотка обмотки и отжиг
- Намотка кабеля – экспериментальная машина
- Тренировка и испытания – стенд в 203А
- Разработка - с 78 г. по 91 г. + по н.в...
- Изготовлены и испытаны магниты Нуклотрона, на том же оборудовании – разработка магнитов Бустера

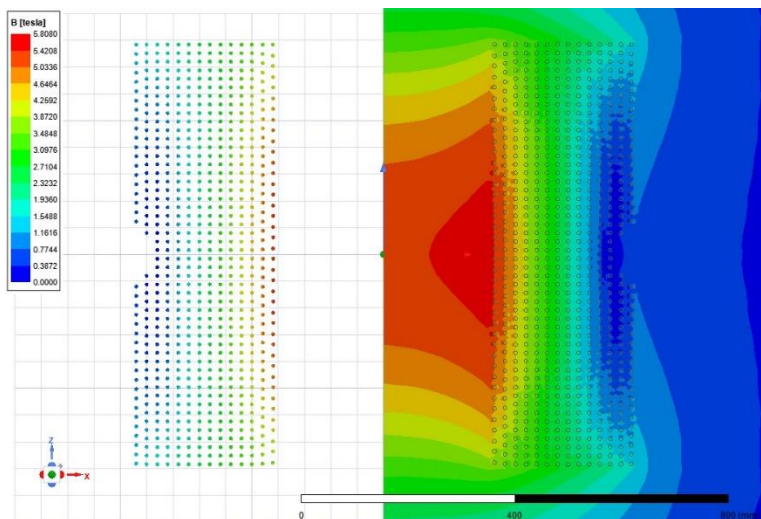
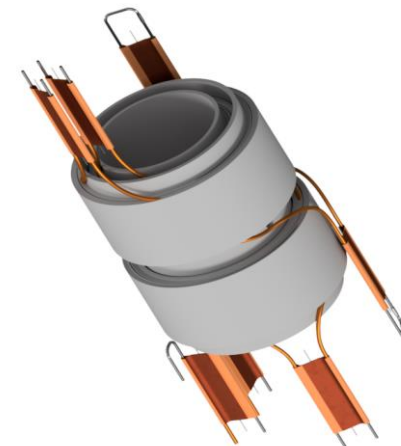
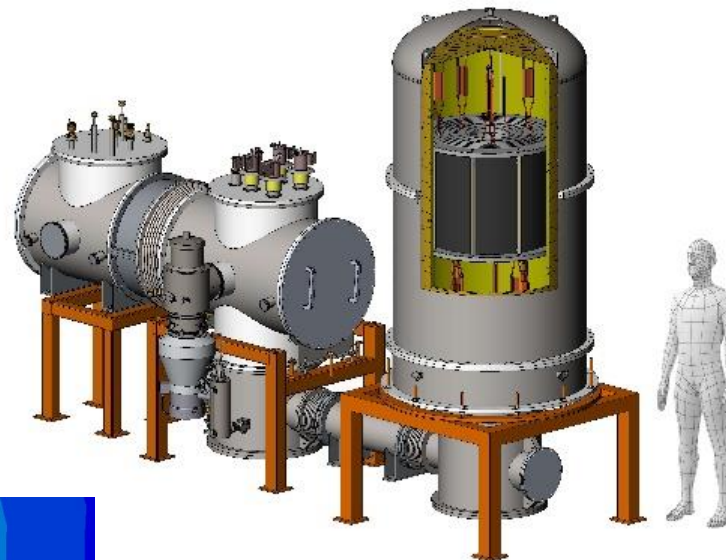
«Фабрика магнитов»

- Кабельная машина для HT кабеля
- Оборудование для намотки обмоток (стапели), для монтажа, печи для полимеризации
- Стенд для криогенных токовых испытаний до 15 кА до 40 кА/с (4.2 К + ВТСП стенд до 70 К)
- Магнитные измерения, изготовление магнитометров
- Вакуумные стенды
- Лаборатория компаундов
- +
- Производство измерительных систем и автоматики защиты
- КГУ
- Мастерские
- +
- ЛМ-Инвертор, МГТУ, С-Инновации, Суперокс, Спецтехника, Суперпласт
- +
- МИФИ, ОИВТ, НИИЭФА и т.д.

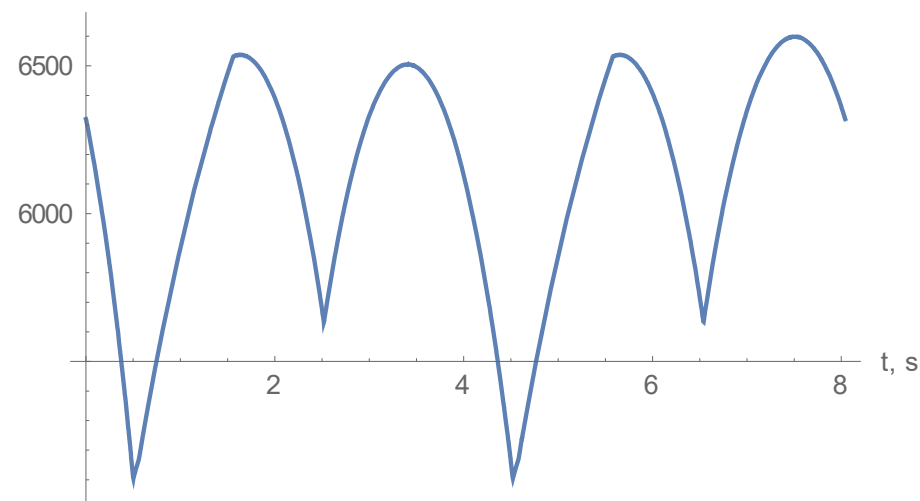


ВТСП SMES и Новый Нуклотрон

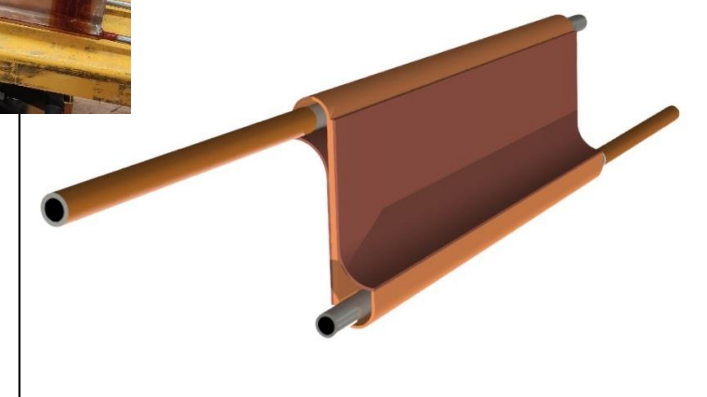
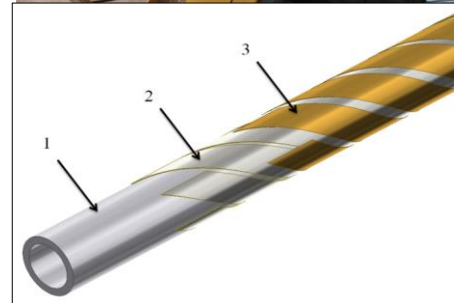
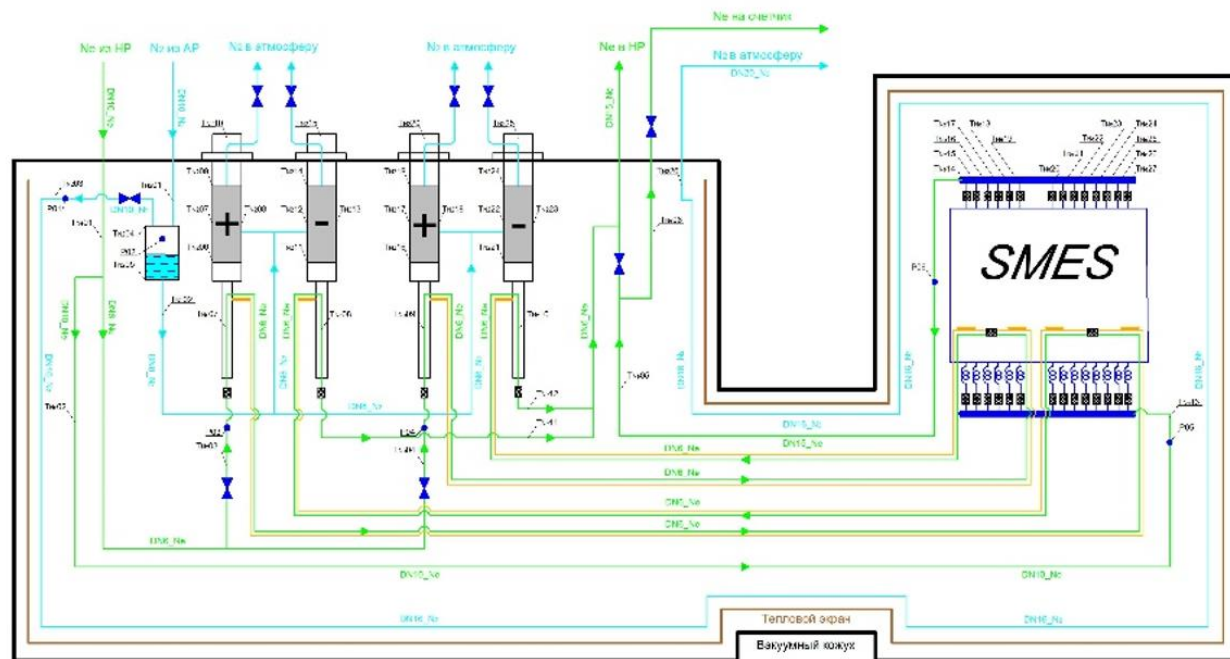
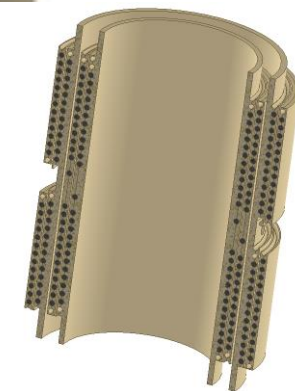
- SMES импульсный в систему питания Бустера и Нуклотрона
- 3 МДж, ~1 МВт
- 8 кА, до 6 Тл, 30К, LNe (26 г)
- Новый Нуклотрон
- НИОКР в 24-26 гг.
- 48 диполей (3 м) и 64 квадруполья,
- 10.6 кА, 1.8 Тл
- 30 (40-60) К



SMES current B+N, A



SMES – изготовление, охлаждение, питание



Магниты Нового Нуклотрона

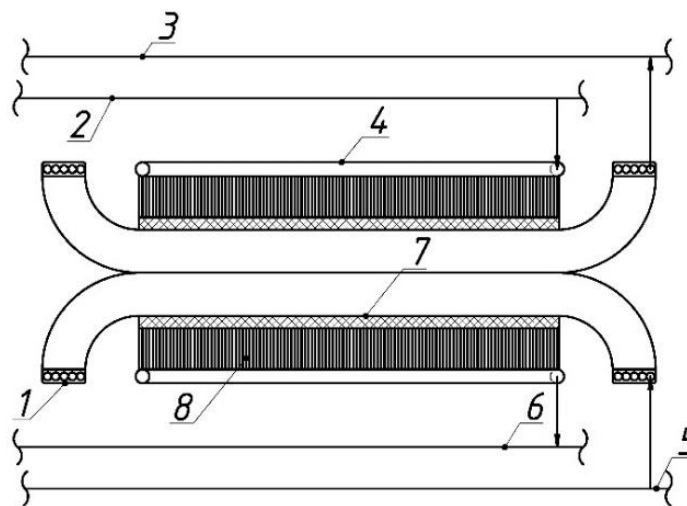
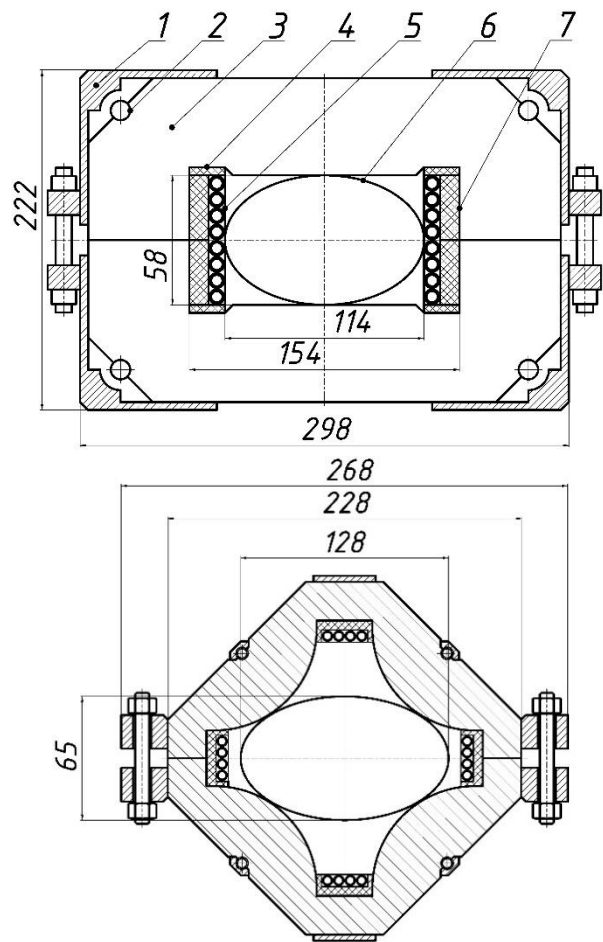
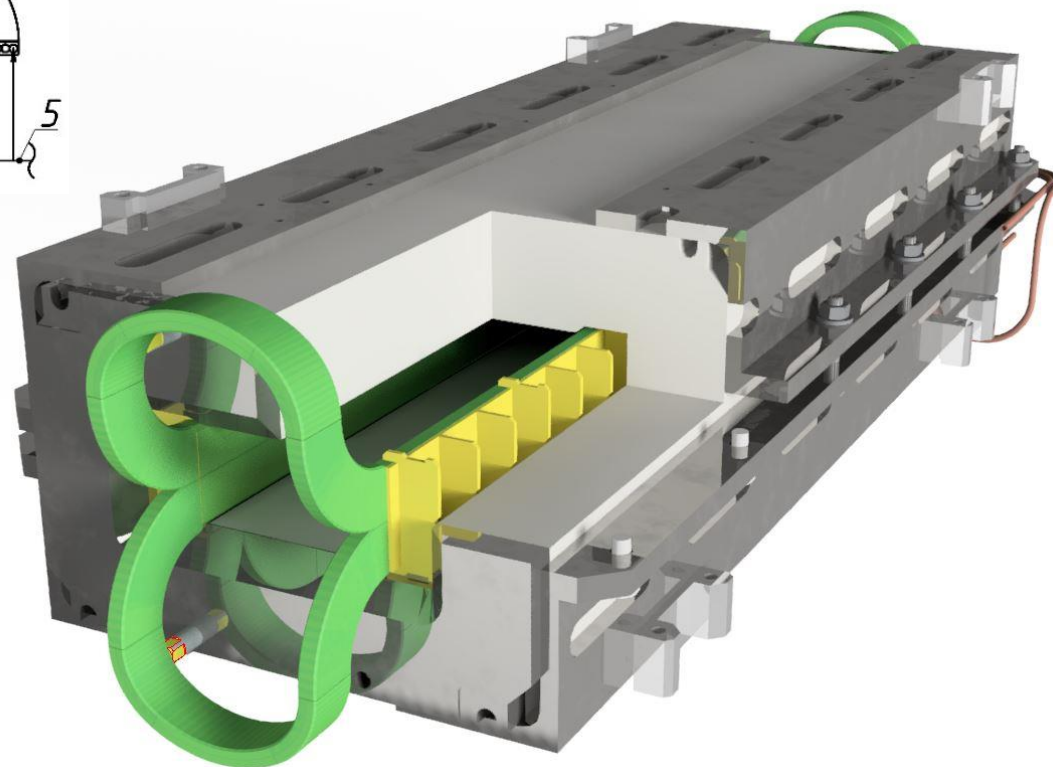
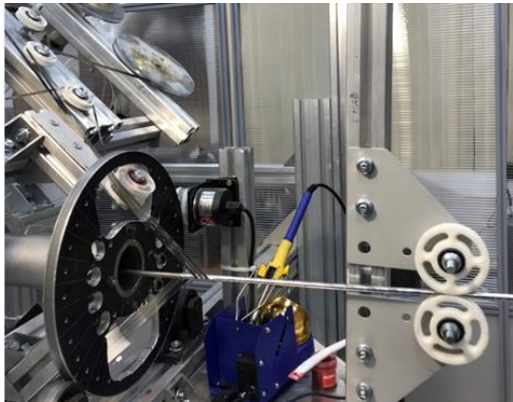
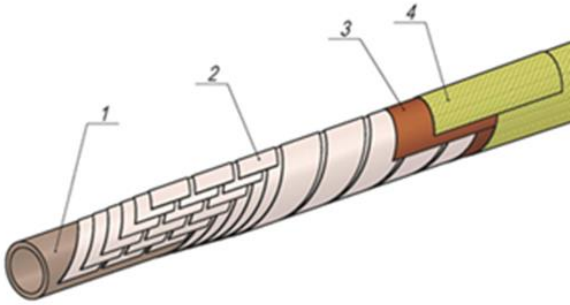


Схема магнита с комбинированным охлаждением потоками газообразного гелия и кипящего азота: 1 – сверхпроводящая обмотка; 2 – питающий коллектор с жидким азотом; 3 – отводящий коллектор с газообразным гелием; 4 – трубка для охлаждения ярма; 5 – питающий коллектор с газообразным гелием; 6 – отводящий коллектор с азотом; 7 – тепловая изоляция обмотки от ярма; 8 – железное ярмо магнита

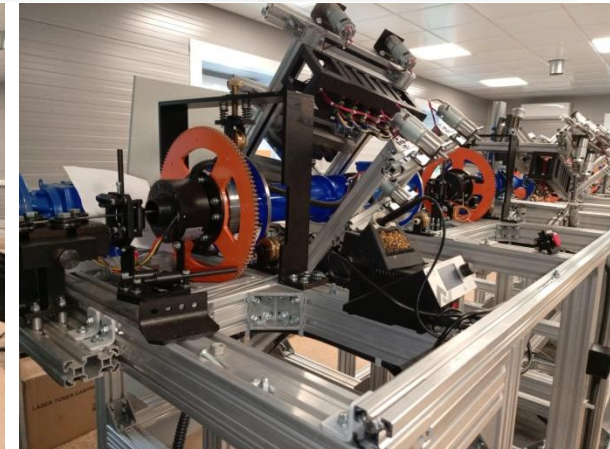
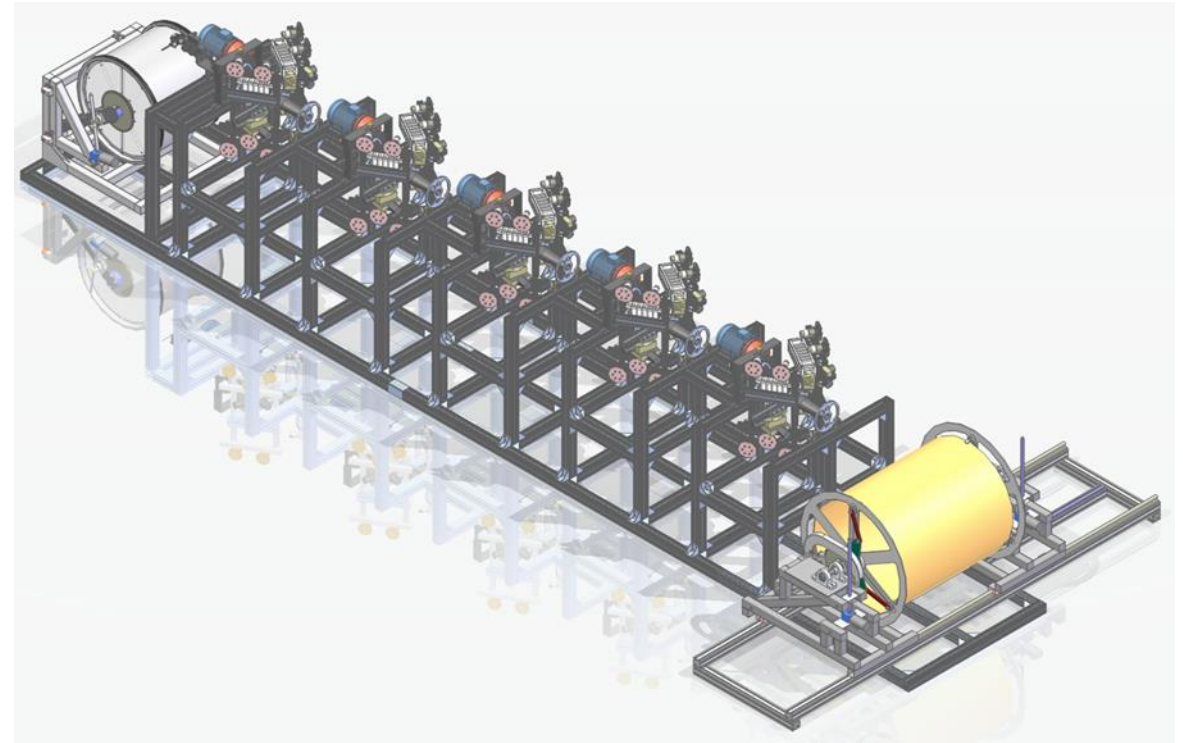


Вид поперечного сечения дипольного магнита и квадрупольной линзы ва)
Нового Нуклотрона с комбинированным охлаждением: 1- уголок; 2 –
трубка для охлаждения ярма; 3 – ярмо; 4 – торцевая проставка; 5 –
обмотка; 6 – пучковая камера; 7 – боковая проставка

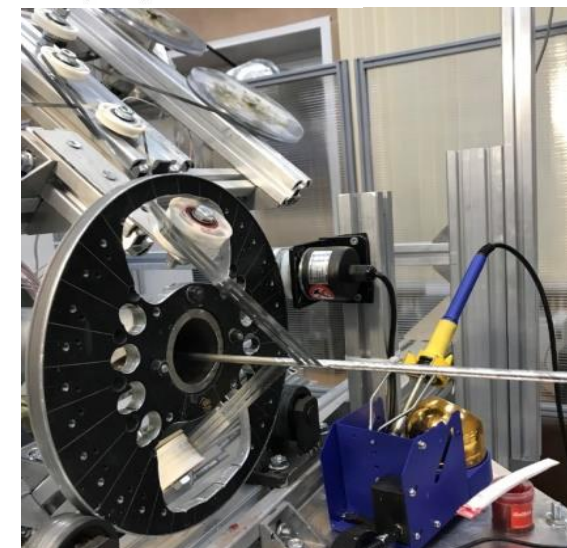
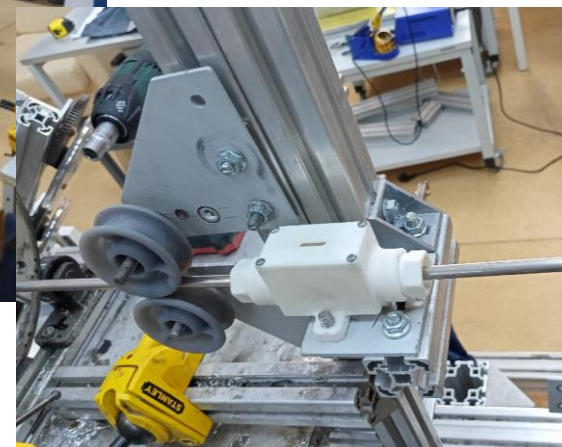
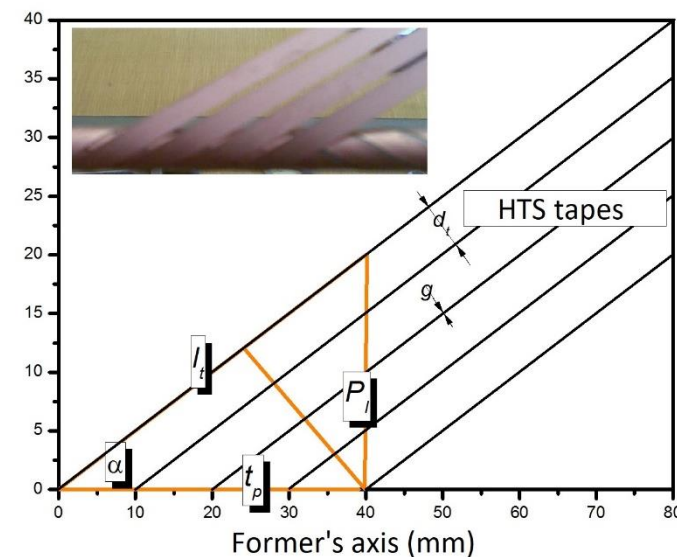
ВТСП кабель и первые ВТСП магниты



- ВТСП Нуклотронный кабель
- Экспериментальная кабельная машина
- Высокая гибкость
- Импрегнированный кабель горячего отверждения
- Низкорезистивные терминалы и спаи
- Серийная кабельная машина с намоткой соленоидов

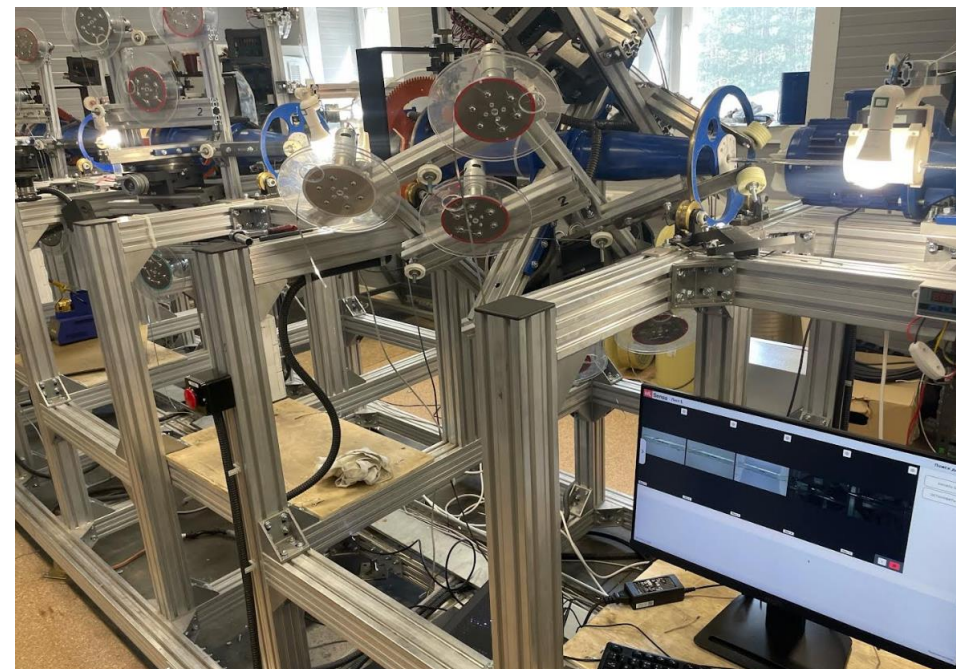
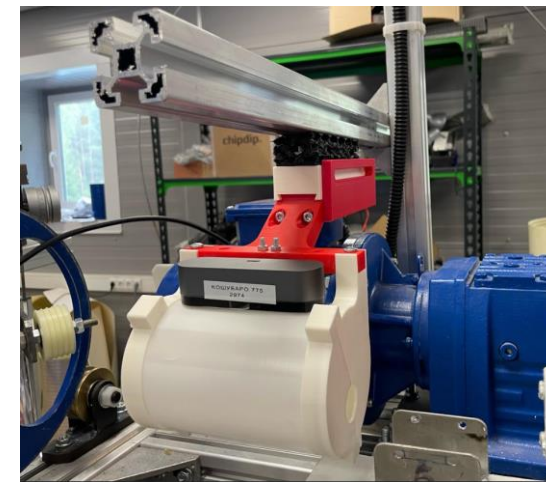


Экспериментальная ВТСП кабельная машина



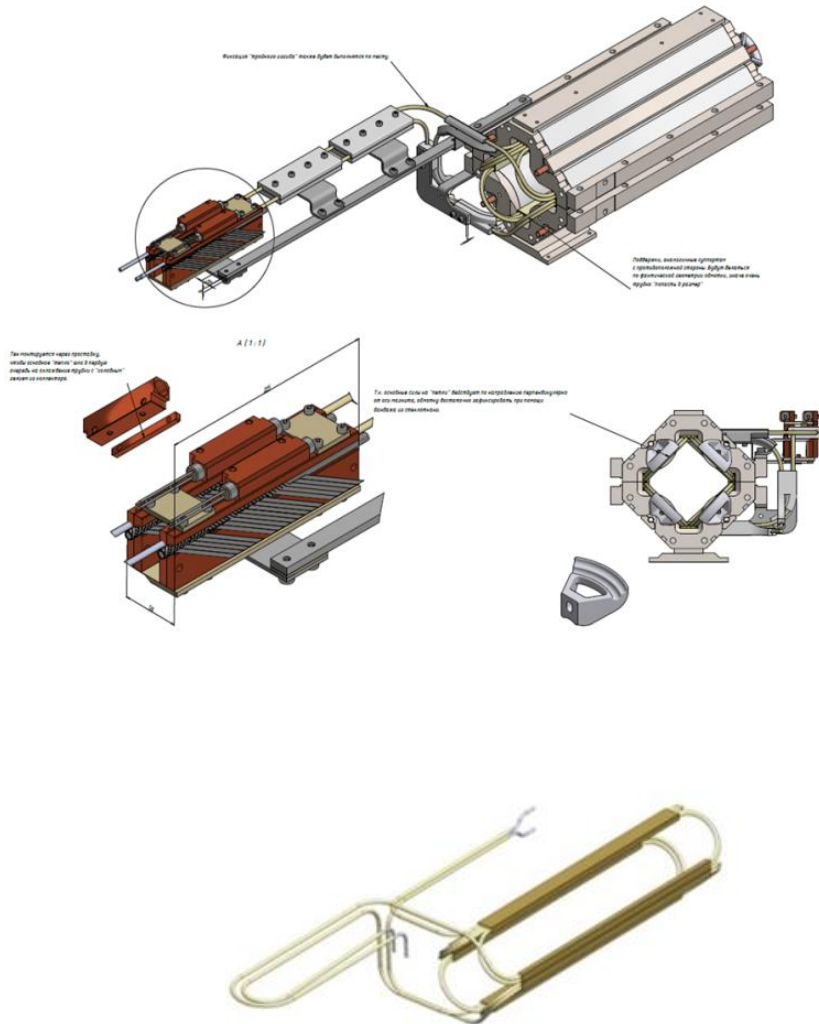
Расчетные углы и шаги твиста, синхронизация
Алгоритмы натяжения лент и кабеля
Импрегнирование

«Серийная» кабельная машина



То же, но 5 узлов для ВТСП лент
+ узел препрега и каптона, + намотка банджа
+ намотка соленоидов прямо с потока кабеля
+ импрегнирование с электрическим нагревом кабеля
+ машинное зрение для распознавания дефектов

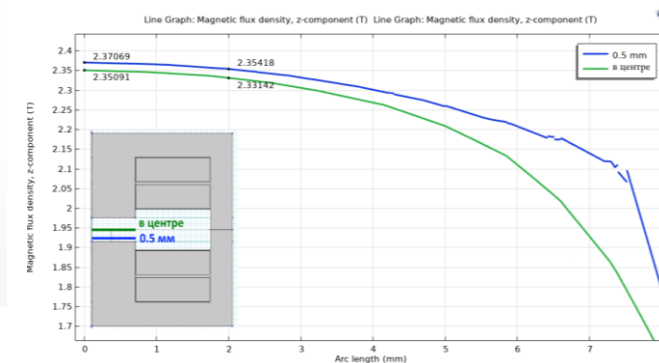
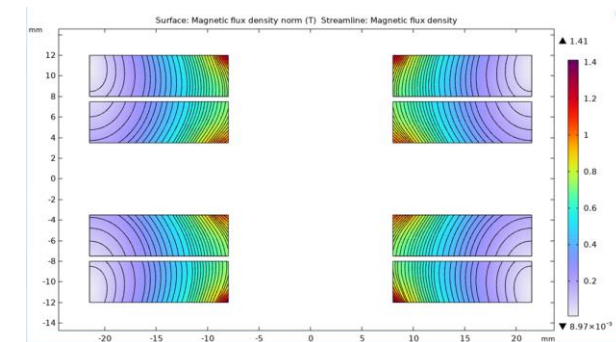
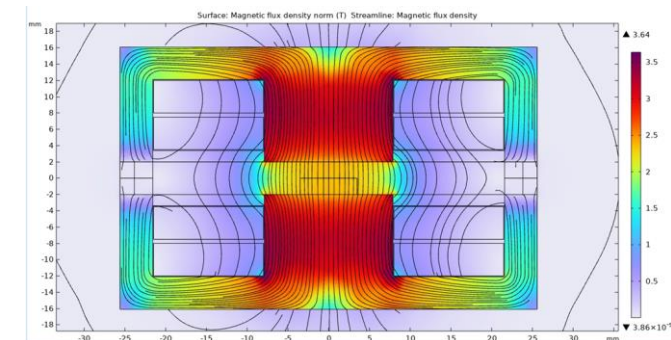
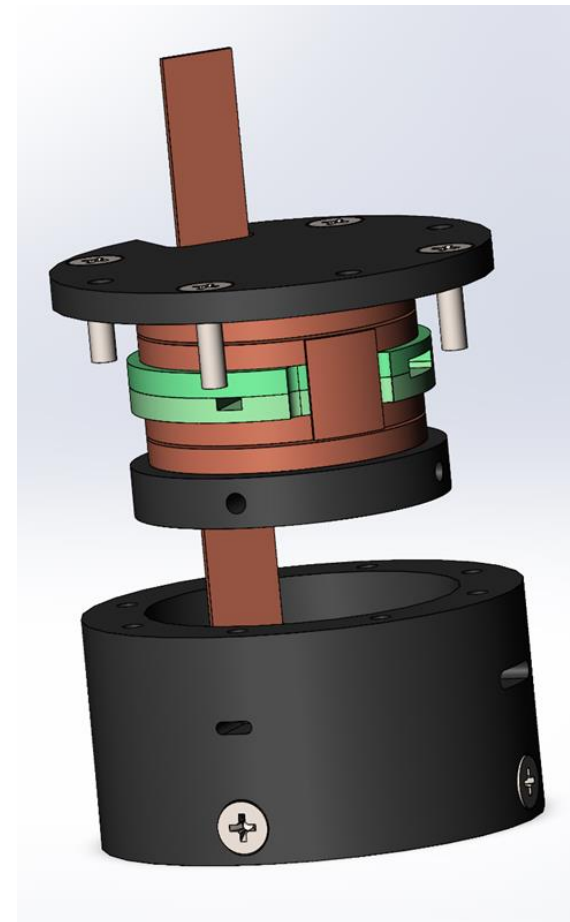
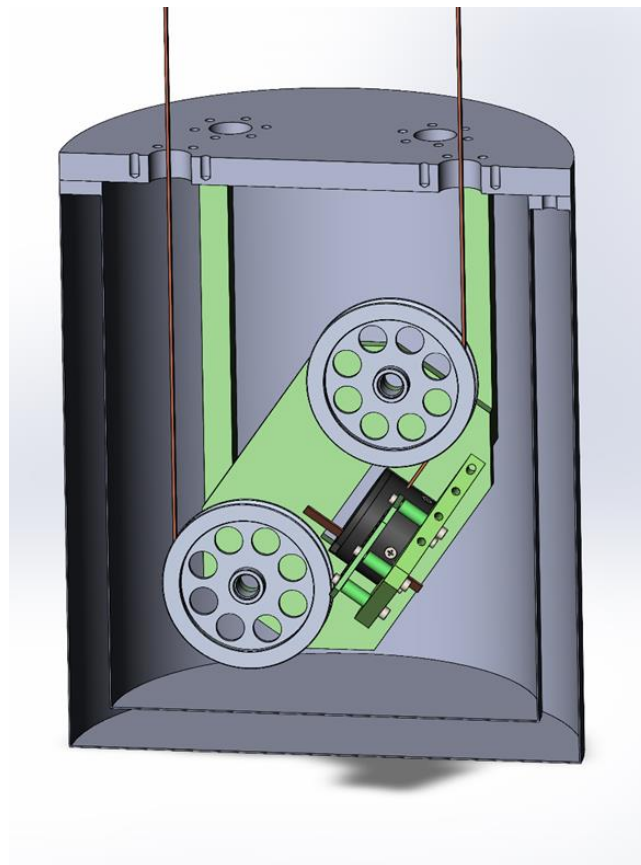
ВТСП кабель и первые ВТСП магниты



- Квадруполи с ВТСП кабелем из 18 лент, 10 кА 1.8 Тл пока 30 К
- Стенд для ВТСП до 15 кА до 40 кА/с 5-70 К, GHe
- Методика проверки ВТСП ленты при перемотке
- Сотрудничество по расчетам и экспериментальным исследованиям

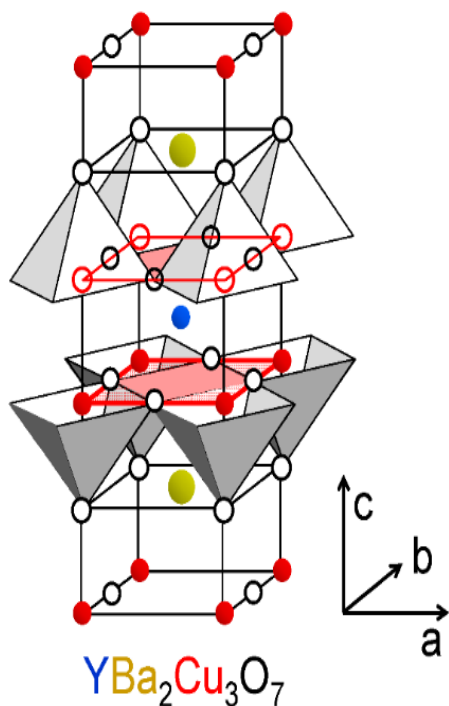


Методики измерений криттока при перемотке в хладагенте

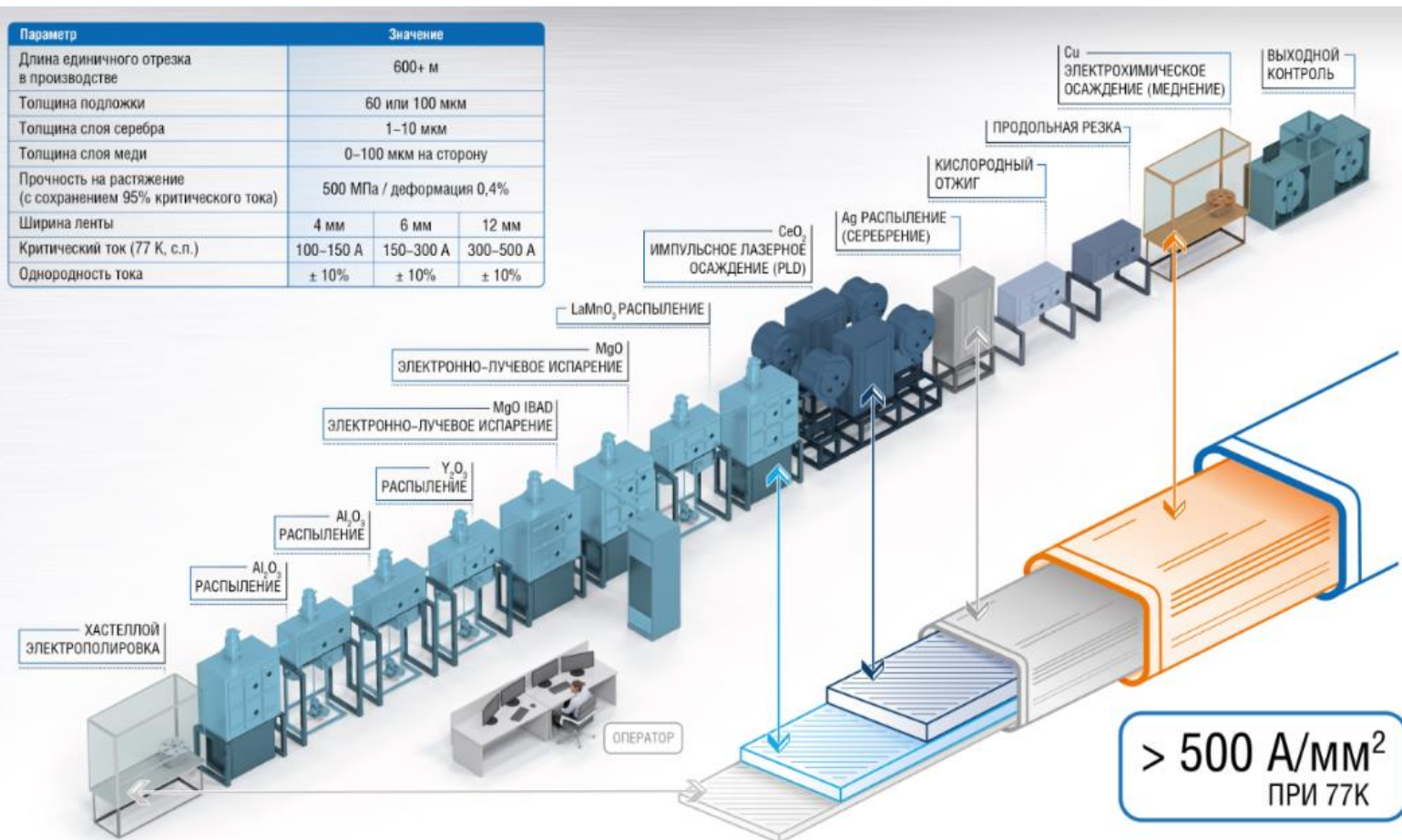


Предпочтения по ВТСП лентам

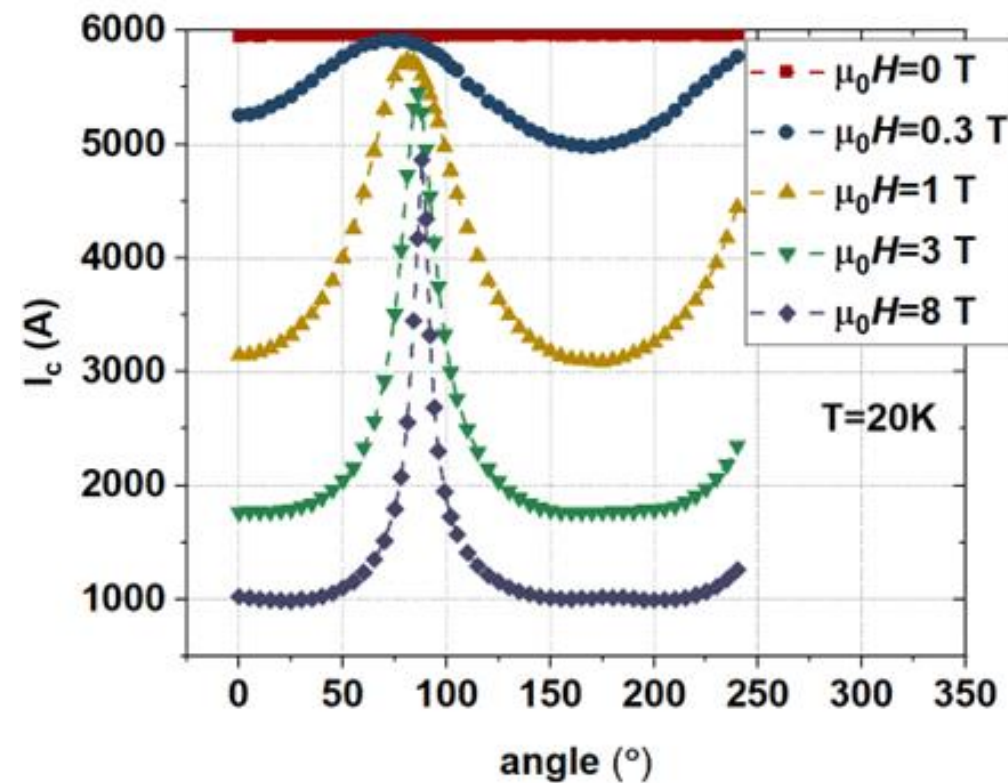
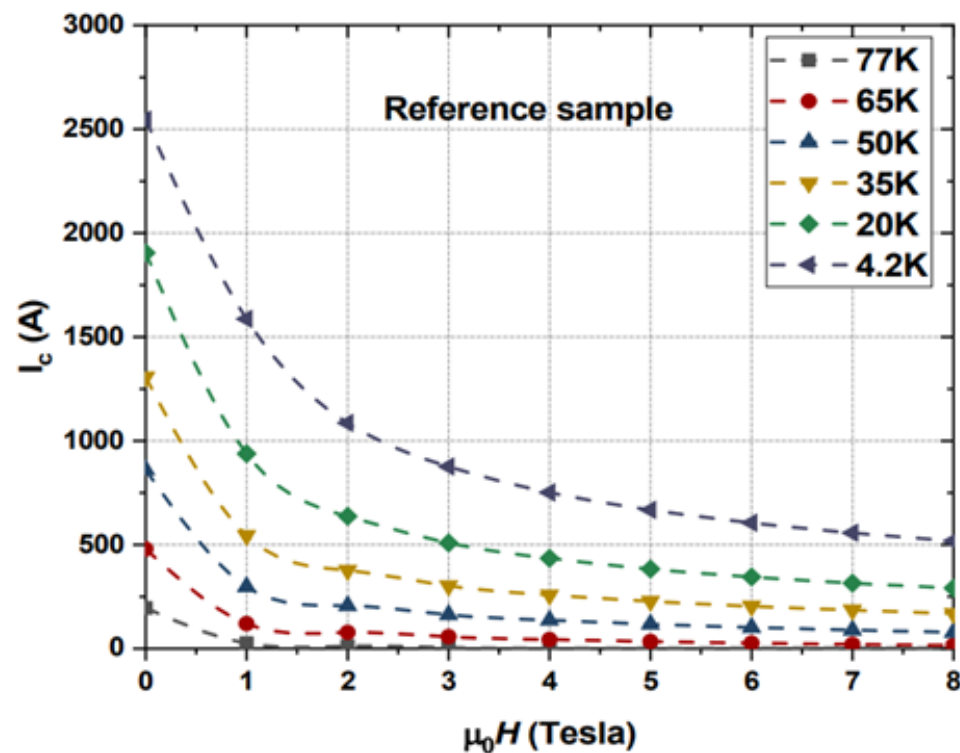
- Высокополевая от С-Инновации (Суперокс)
- Альтернативы?



Параметр	Значение		
Длина единичного отрезка в производстве	600+ м		
Толщина подложки	60 или 100 мкм		
Толщина слоя серебра	1–10 мкм		
Толщина слоя меди	0–100 мкм на сторону		
Прочность на растяжение (с сохранением 95% критического тока)	500 МПа / деформация 0,4%		
Ширина ленты	4 мм	6 мм	12 мм
Критический ток (77 К, с.п.)	100–150 А	150–300 А	300–500 А
Однородность тока	± 10%	± 10%	± 10%

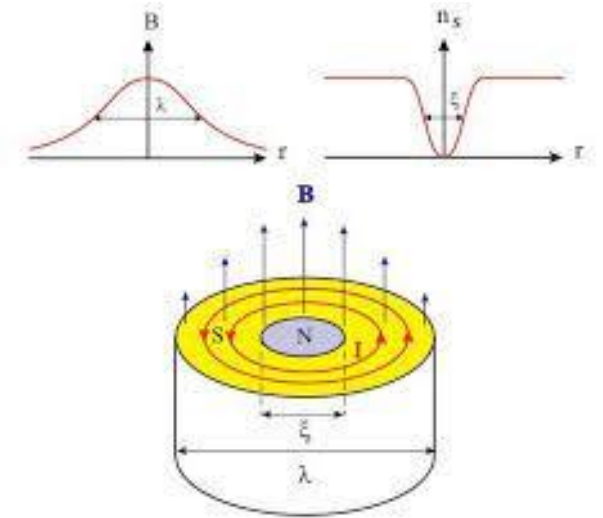
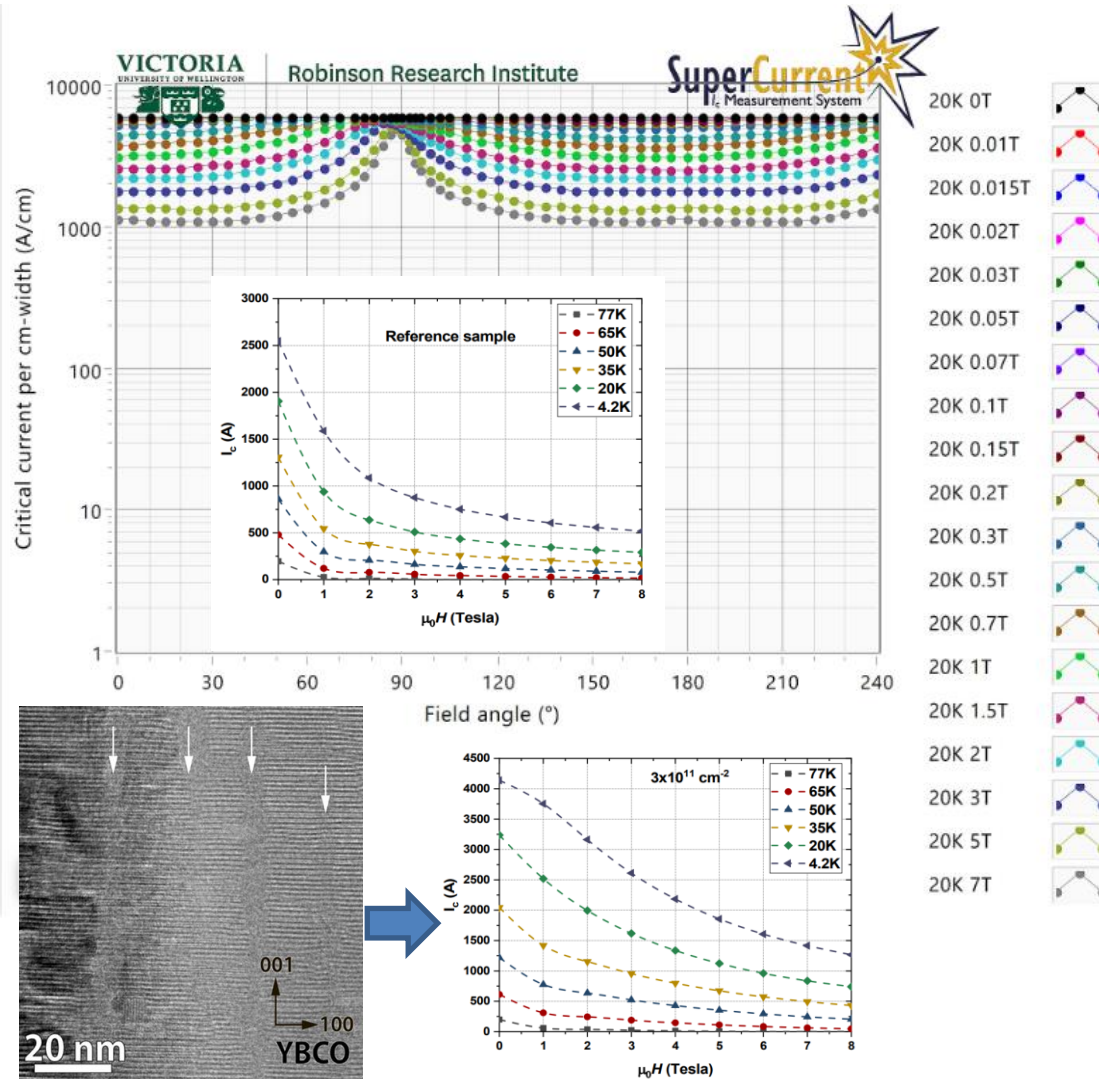
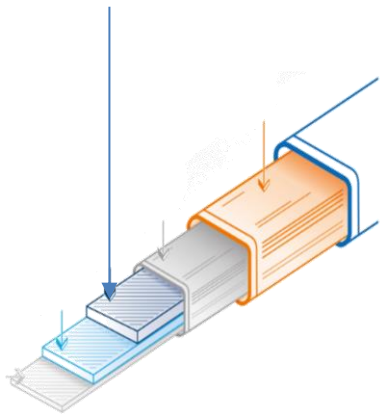
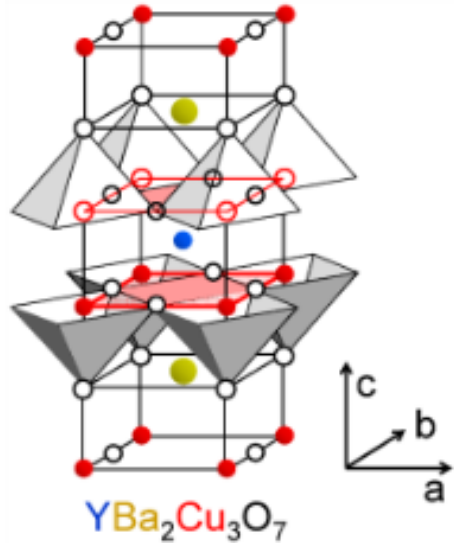


Критическая поверхность, анизотропия к полю

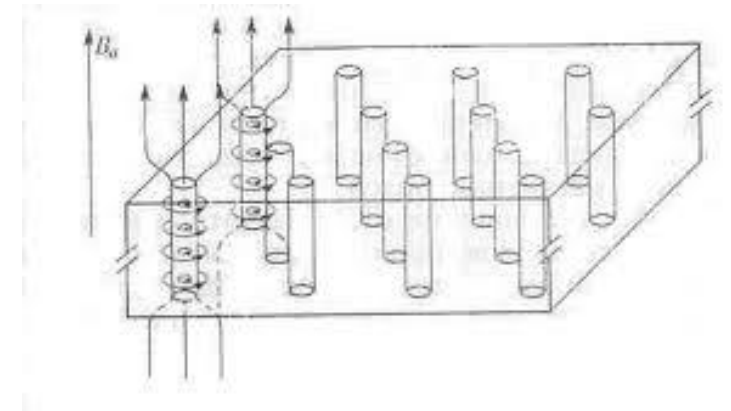




Что такое пиннинг и зачем он в сверхпроводящем проводе



Дополнительные центры пиннинга повышают критток в поле при $T=\text{const}$ и выравнивают угловую зависимость



Радиационные дефекты от заряженных частиц – лучшие дополнительные центры пиннинга

Критический ток ВТСП лент в поле сильно снижается с температурой, и сильно анизотропен по отношению к углу ленты к магнитному полю



Радиационный пиннинг ВТСП



Виды облучения:

- Ионы Xe 167 МэВ на ИЦ100
- Ионы Bi 660 МэВ на У400
- Протоны 660 МэВ (+ вторичка), Фазотрон, короткие куски и бобины
- Протоны 18 МэВ
- Ионы Xe ~500 ГэВ, Нуклотрон

Технологии:

- Хе, Kr при перематке в пучке в вакууме на У400 и в 2026 в планах на ДЦ140,

Другие возможные исследования:

- Вторичные ионы на Нуклотроне
- Электроны Линак200, протоны от 20 МэВ до 1 ГэВ





Радиационный пиннинг ВТСП

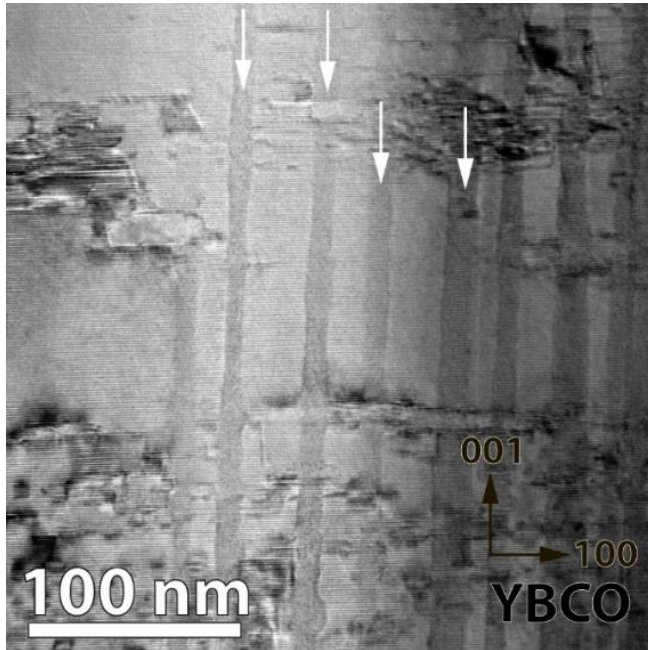


- Наилучший результат в нашем главном целевом диапазоне - около 2 Тл 50 К – на ионах из циклотрона (Xe 167 МэВ) – критток ВТСП ленты увеличивается до x3.5 раз

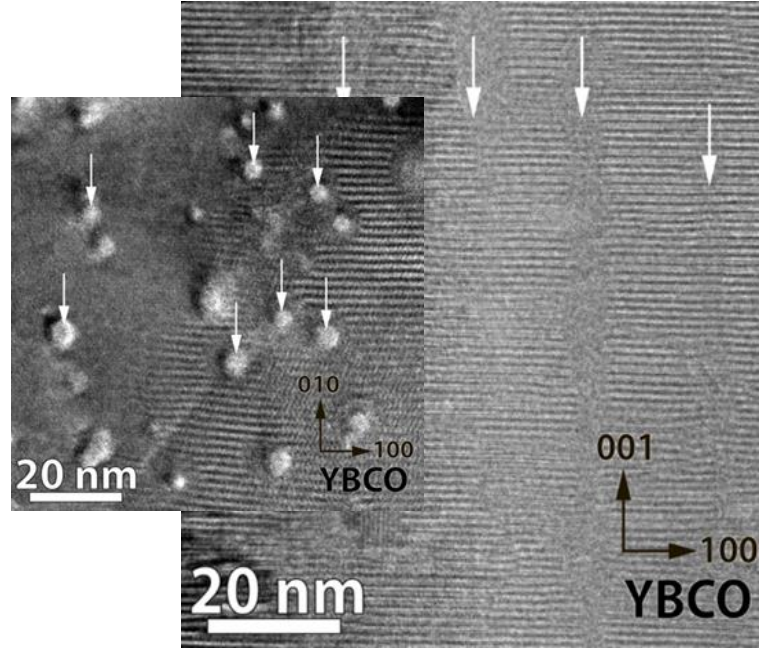
Таблица 1. Параметры исходного и облученных различным флюенсом образцов.

Флюенс, см ⁻²	I _c , A (4мм, H=0, 77K)	I _c , A (4мм, H=2T, 50K)	I _c , A (4мм, H=8T, 20K)	T _c , К	XRD RD FWHM, град. (полуширина кривой качания (005)YBCO вдоль ленты)	XRD TD FWHM, град. (полуширина кривой качания (005)YBCO поперек ленты)	XRD Phi (103)YBCO scan средний FWHM, град.
0	195	207	291	88	1.129	1.350	2.86
3·10 ¹⁰	195	257	336	88	1.144	1.887	3.39
8·10 ¹⁰	233	368	400	87.8	1.163	2.33	3.81
1·10 ¹¹	274	455	496	87.7	1.175	2.413	4.53
2·10 ¹¹	270	735	734	87.4	1.227	5.346	5.03
3·10 ¹¹	198.5	635	725	87	1.179	3.079	4.39
5·10 ¹¹	171	644	921	86.5	1.192	4.359	5.29
1·10 ¹²	63	397	906	84.5	1.268	5.294	5.89

Треки циклотронных ионов в ВТСП слое

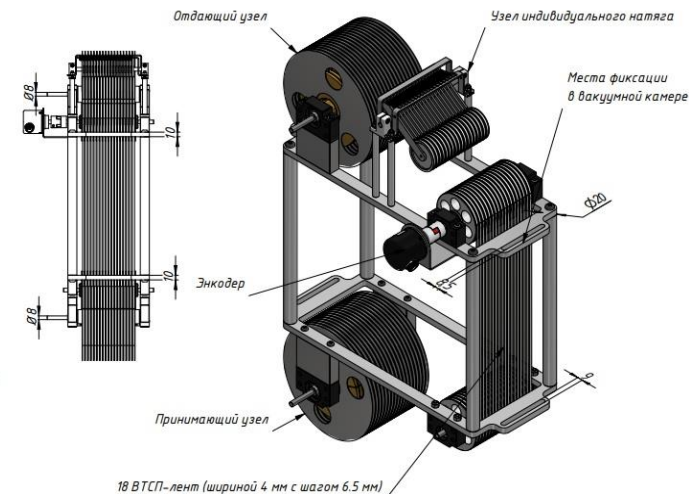
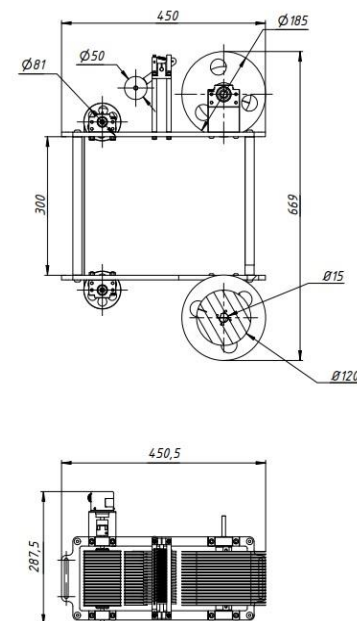
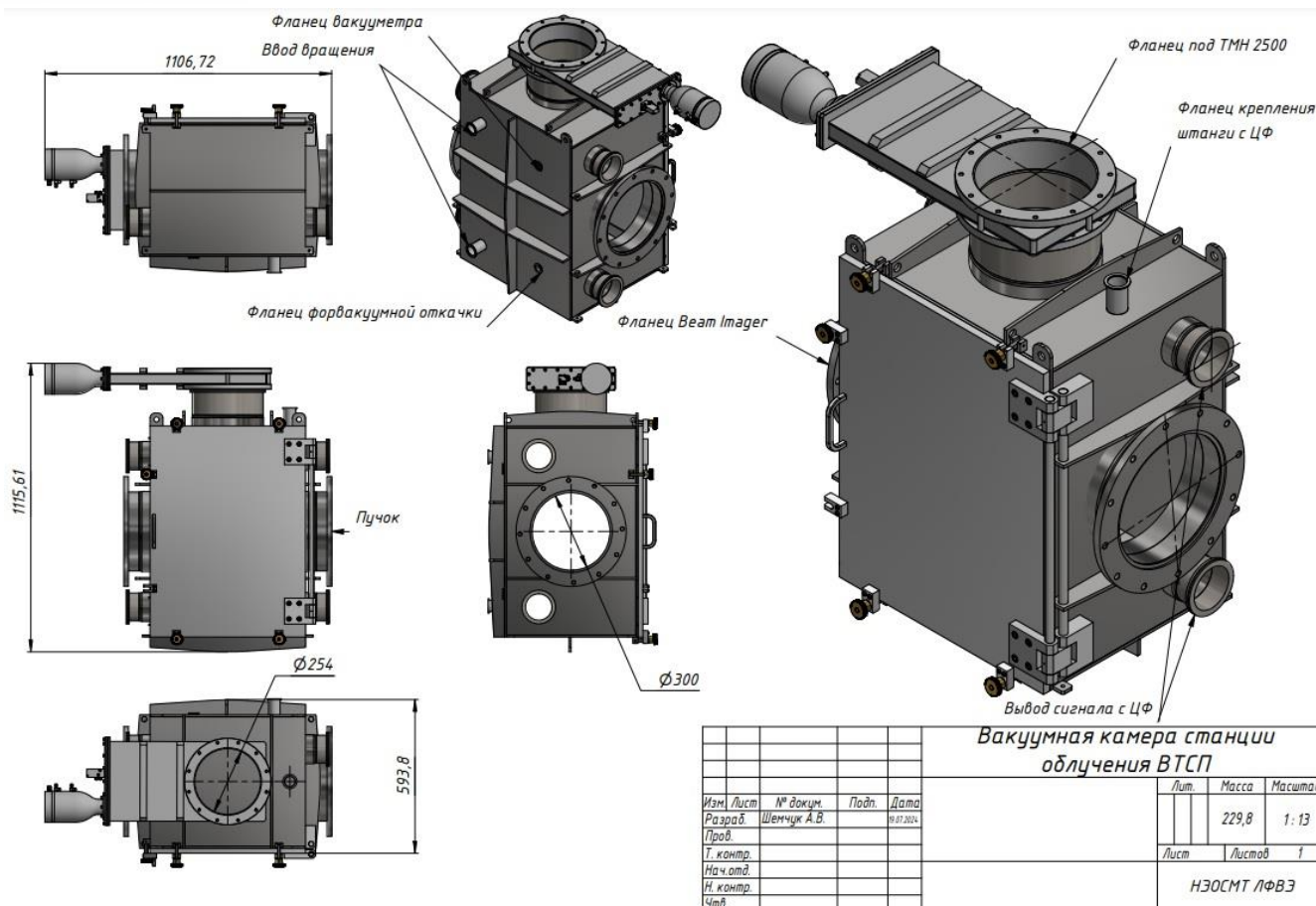


• Bi 660 MeV



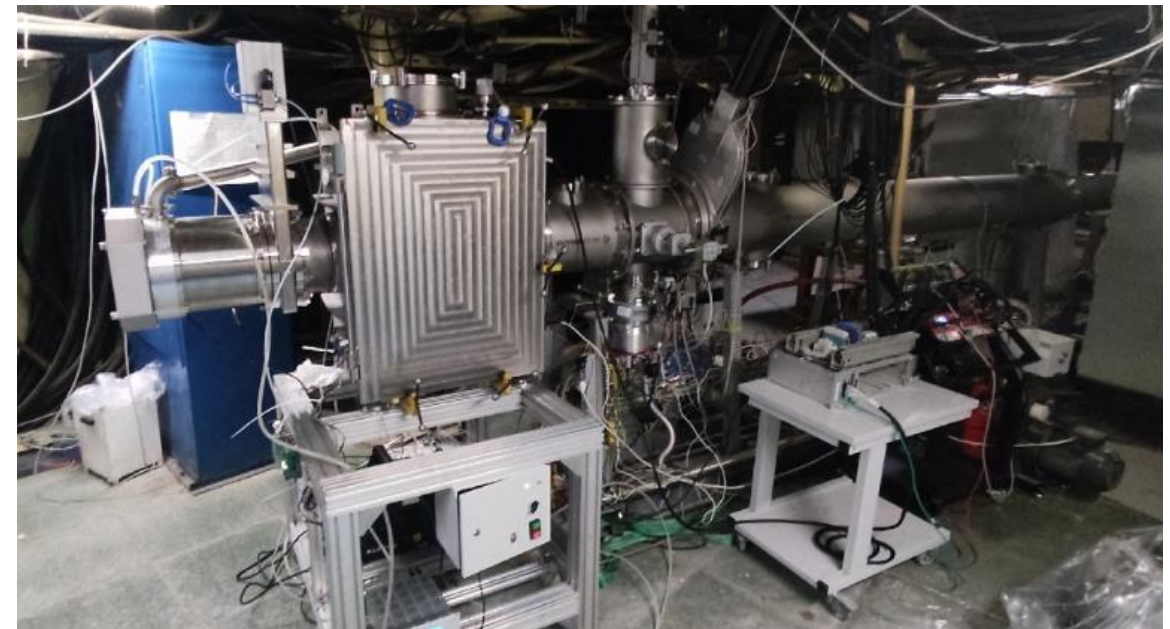
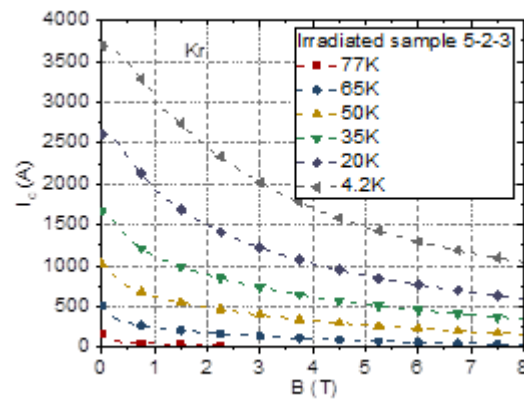
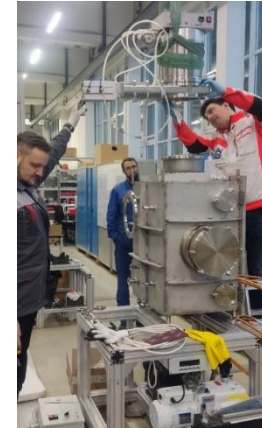
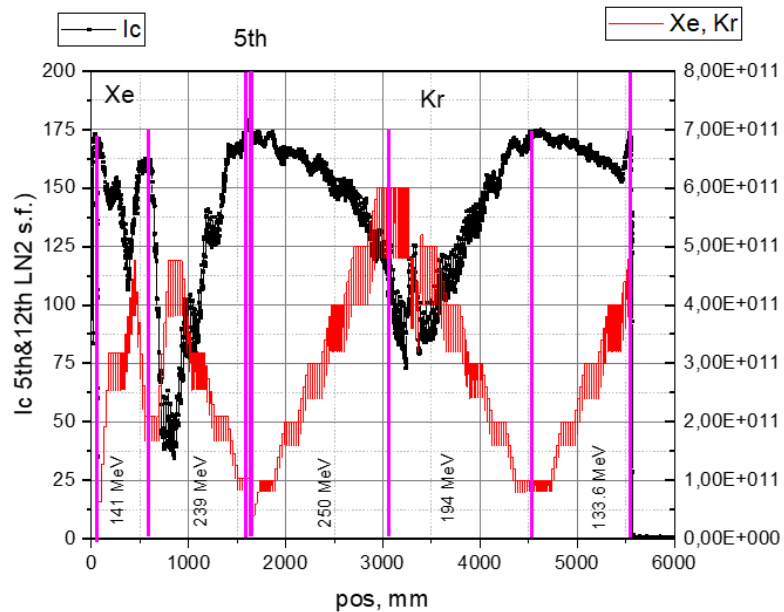
Xe 167 MeV

Kr 250 MeV

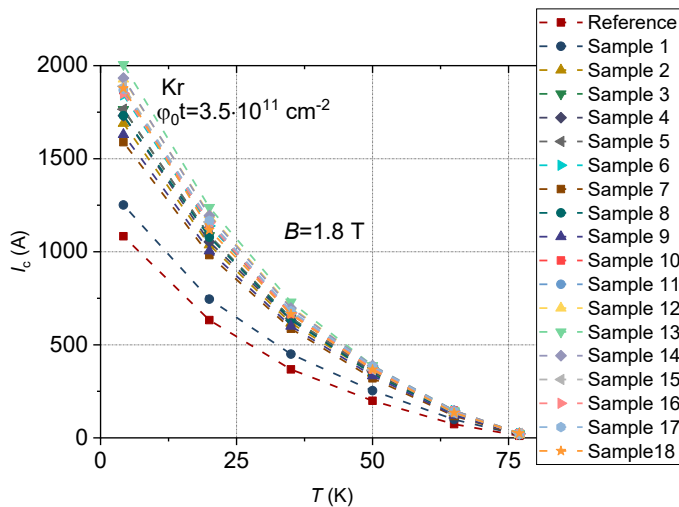
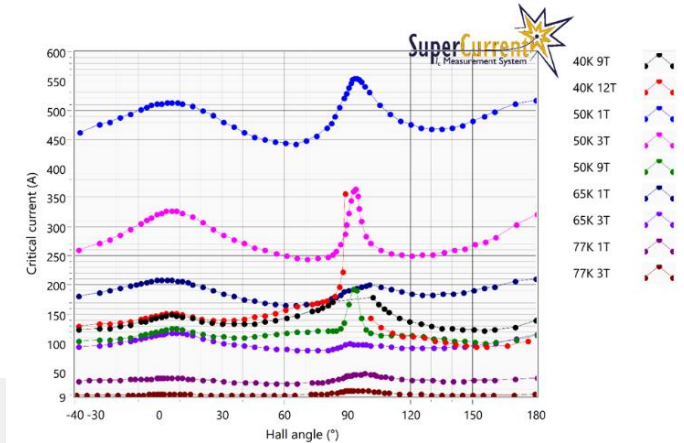
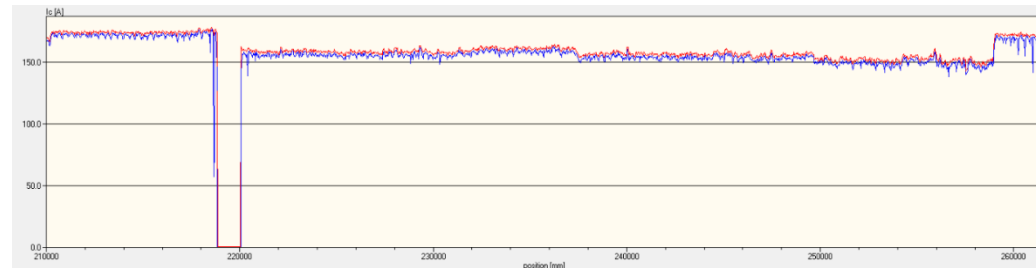
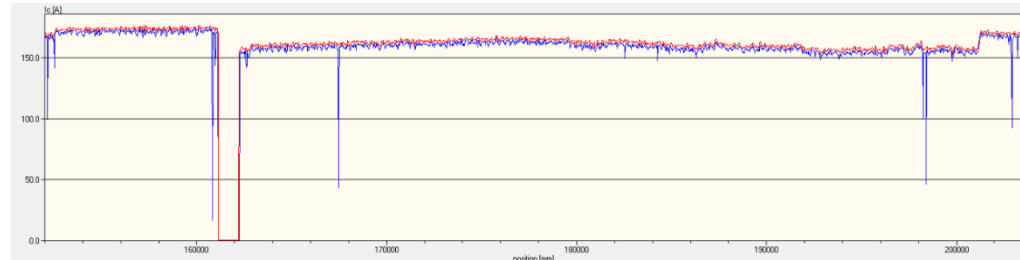
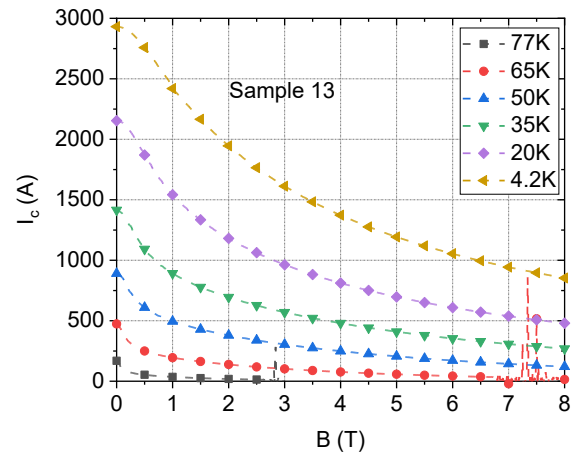


Модуль для облучения ВТСП				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Разработка технологии облучения длинных кусков ВТСП лент при перематке через пучок



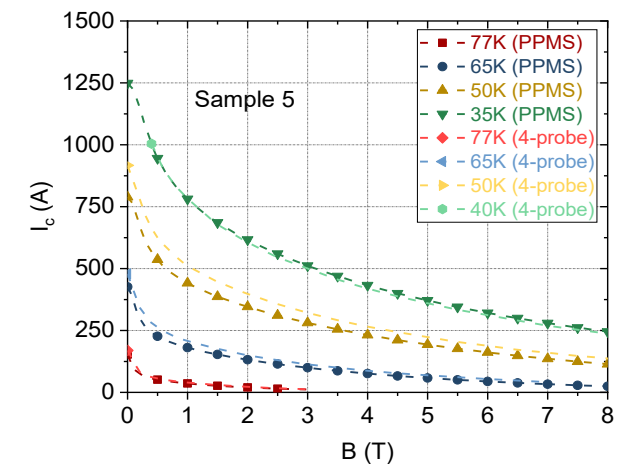
Результаты облучения 18 бобин ВТСП ленты (суммарно около 1 км) криптоном на У-400



Поток до $6 \cdot 10^8$ ионов/см²*с

Планируем:

- 1 м модельный диполь НН из облученной ленты
- Сеанс облучения 1.8 км ленты на 3 м диполь НН
- Сеансы на ДЦ-140 с 2026 г. (большой поток Хе или Кр, создание магнитов Нового Нуклотрона, выход на коммерциализацию технологии)



Перспективы применения

- **Магнитные системы ускорителей частиц – синхротронов и циклотронов, детекторы, ионные источники, фокусирующие и поворотные магниты, gantry**
- **Магниты термоядерных устройств – кабель «100 кА 20 Тл 20 К, радиус изгиба от 200 мм», импрегнированный, 220 А на ленту, удвоение пиннингом на легких ионах $\sim 10^{12} \text{ см}^{-1} = 440 \text{ А}$, 248 лент, CuNb трубка 12.7 мм (канал $\sim 7.62 \text{ мм}$), 30 слоев по 7-10 лент, диаметр кабеля до 20 мм с изоляцией из полиимида и препрега, компаунды - горячего отверждения**
- **Маленький учебный токамак МИФИ – проект создания ВТСП обмотки проходит согласование**
- **Лабораторные магниты – высокополевые или «азотные», переменные и импульсные, мобильные, портативные, очень большие, NbTi...**
- **Устройства для применений в космосе – плазменные двигатели, защита от заряженных частиц, искусственное магнитное поле**
- **Электроэнергетика и транспорт – двигатели, генераторы, трансформаторы, маглев, линии электропередачи**
- **Магнитное поле для томографов «на ВТСП»**
- **Индукционный нагрев, СВЧ генерация, гиротроны и т.д.**

Коллективы и их работы по тематике

- ОИЯИ ЛФВЭ - координация и организация, разработка машин, стендов, методик и станций облучения, Нуклотрон и Новый Нуклотрон

Г. Г. Ходжибагян – научное руководство разработками ВТСП магнитов

Отдел НЭОСМТ (Д. Н. Никифоров), в нем сектор ВТСП магнитов (М. С. Новиков) и в нем группа ВТСП технологий (А. В. Шемчук) – многие сотрудники отдела участвуют в ВТСП тематике

Ученые из отделения №5 (С. И. Тютюнников, О. В. Белов, В. И. Стегайлов, Г. И. Смирнов и другие)

- ОИЯИ ЛЯР – облучение на ионных циклотронах – В. А. Скуратов, В. А. Семин, С. В. Митрофанов, О. М. Иванов и другие
- ОИЯИ ЛЯП – Фазотрон (Г. В. Мицин, Н. Г. Шакун и другие)
- ЛЯП, Линак200 – Валерий Кобец и команда – первые эксперименты с электронами
- НИЯУ МИФИ. Коллектив **И. А. Руднева** (сейчас возглавляет С. В. Покровский) – расчеты, проектирование исследовательских методик, исследования сверхпроводников.
- ОИВТ (+ КИ, ФИАН, С-Инновации и другие организации). Коллектив под руководством П. Н. Дегтяренко – исследования намагниченности и криттока, рентгеноструктурные, электронная микроскопия дефектов
- (из 2 последних коллективов несколько сотрудников уже в ОИЯИ по совместительству)

Выводы

- Разработана технология изготовления ВТСП Нуклотронного кабеля
- Изготовлены 2 ВТСП кабельные машины – «опытная» и «серийная»
- Научились делать гибкий кабель, импрегнированный кабель, спаи
- Соленоиды (SMES) можно изготавливать прямо на кабельной машине
- Технология диполей и квадруполов адаптирована к ВТСП кабелю
- Проведен ряд успешных экспериментов по увеличению криттоков в 2-3 раза заряженными частицами (пиннинг на радиационных дефектах)
- Разработана пилотная технология облучения до 2-3 км ВТСП ленты за неделю на У-400 криптоном с удвоением криттока
- Сделан ВТСП стенд, разрабатывается комплекс измерительных методик
- В 26 году с вводом ДЦ-140 комплекс технологий для ВТСП магнитов Нового Нуклотрона, и не только, будет готов, и можно приступать к их изготовлению
- Этот комплекс технологий можно применять для создания магнитов ускорителей, УТС, промышленных, медицинских, научных магнитных систем