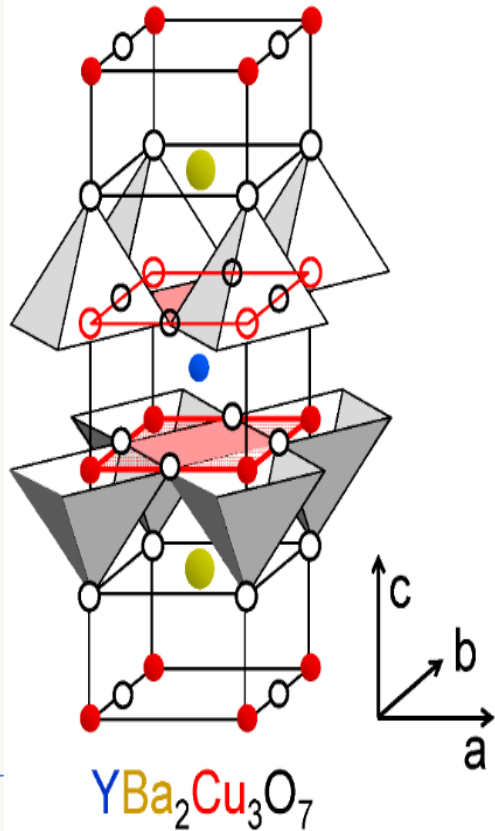




# Возможные подходы к созданию ВТСП магнитов Нового Нуклотрона

Новиков М.С.

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН,  
Новосибирск, 10-13 марта 2026





# Возможные подходы к созданию ВТСП магнитов Нового Нуклотрона

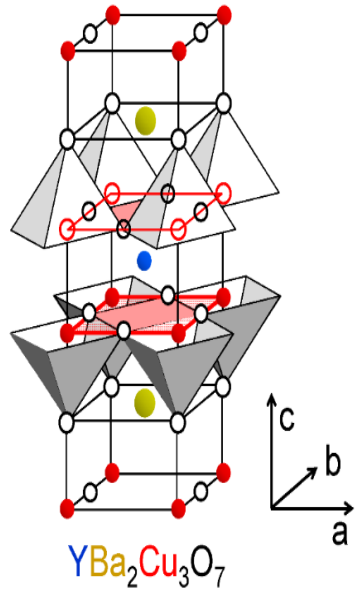
*А. В. Бутенко, П. Н. Дегтяренко, А. В. Константинов, Д. Н. Никифоров,  
М. С. Новиков\*, Е. М. Сыресин, Г. В. Трубников, Г. Г. Ходжибагиян, А. В. Шемчук*  
*Объединенный институт ядерных исследований*

*\*автор-корреспондент*

Аннотация – базовая установка Нуклотрон работает в ЛФВЭ ОИЯИ с 1993 г. За более чем 30 лет работы Нуклотрон обеспечил широкий спектр успешных экспериментов в релятивистской ядерной физике. Согласно программе развития ОИЯИ, в рамках продолжения сооружения комплекса NICA, необходима коренная модернизация инжекционного комплекса коллайдера, в том числе создание нового синхротрона-инжектора взамен Нуклотрона. В качестве основного варианта при создании Нового Нуклотрона рассматриваются дипольные и квадрупольные магниты из высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) кабеля с рабочей температурой от 30 до 50 К. ВТСП магниты в системе Нуклотрона нужны как для снижения эксплуатационных расходов, так и для разработки и внедрения перспективных технологий. Возможны различные виды проточного охлаждения магнитов – жидкий неон, газообразный гелий, отдельное охлаждение ярма азотом, целесообразно отдельное охлаждение жидким гелием высоковакуумной камеры пучка. Рассматривается также вариант охлаждения переохлажденным азотом при температуре 65 К – это работа на перспективу. В ОИЯИ разработана конструкция и технология ВТСП трубчатого кабеля (типа «Нуклотрон») и его соединений, технология радиационного пиннинга ионами, модифицируется технология изготовления обмоток и сборки магнитов из ВТСП кабеля. Созданы кабельные машины, станция облучения на циклотронах с перематкой в вакууме через пучок, модернизирован криогенный токовый испытательный стенд. Изготавливаются ВТСП кабели, в том числе с пропиткой компаундом, и с изоляцией. Получены первые 800 метров ВТСП ленты с увеличенным в два раза критическим током при 1.8 Тл 40 К за счет облучения ионами криптона. Разрабатывается и изготавливается серия экспериментальных магнитов, несколько из них испытаны и показали расчетные параметры. Разрабатываются проекты магнитов Нового Нуклотрона с различными видами охлаждения и конструкциями. Проводится предварительный анализ всех типов магнитных систем, с учетом жизненного цикла Нового Нуклотрона.



# Содержание доклада



- Краткий экскурс в историю Нуклотрона, почему Новый Нуклотрон, и зачем ВТСП
- ВТСП лента 2-го поколения – конструкция и технология (С-Инновации)
- ВТСП кабель Нуклотронного типа и наши кабельные машины
- Радиационный пиннинг ВТСП – эксперименты и технология
- Станции облучения, ВТСП магниты Нуклотрона, спаи, импрегнирование кабеля,
- Возможные конструкции ВТСП диполей и квадруполей и их параметры
- Преимущества и недостатки магнитных систем различных конструкций
- Необходимые исследования – планы НИОКР
- Планы по разработке, изготовлению и испытаниям экспериментальных магнитов
- Выводы



# Нуклотрон и Бустер NICA



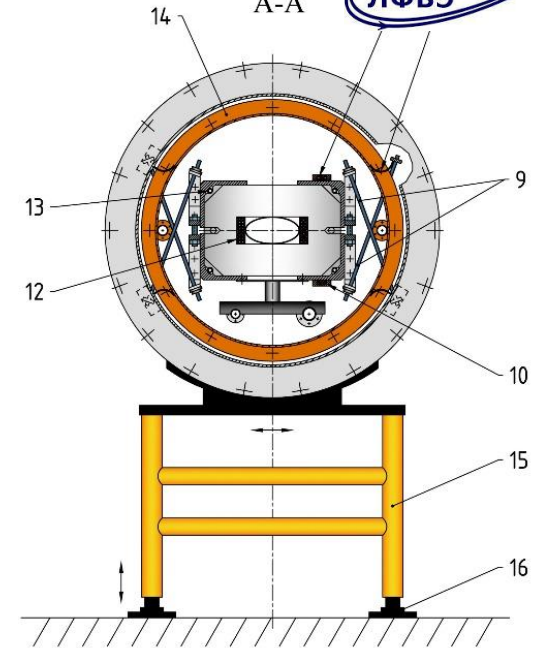
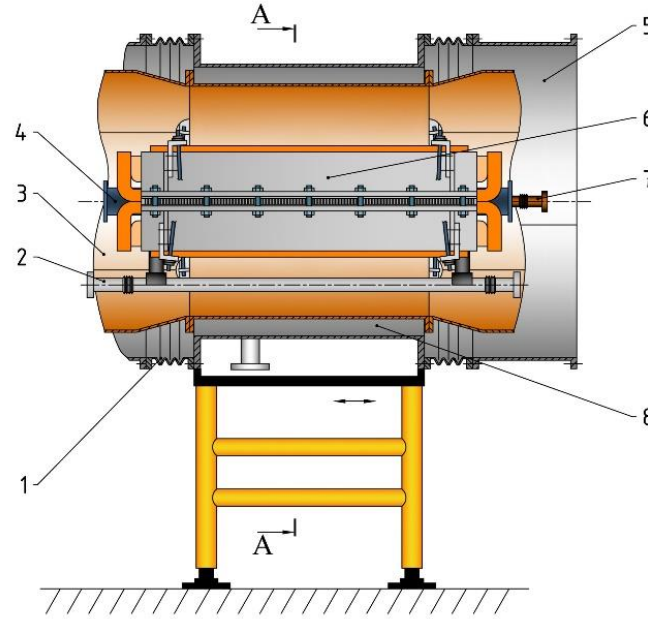
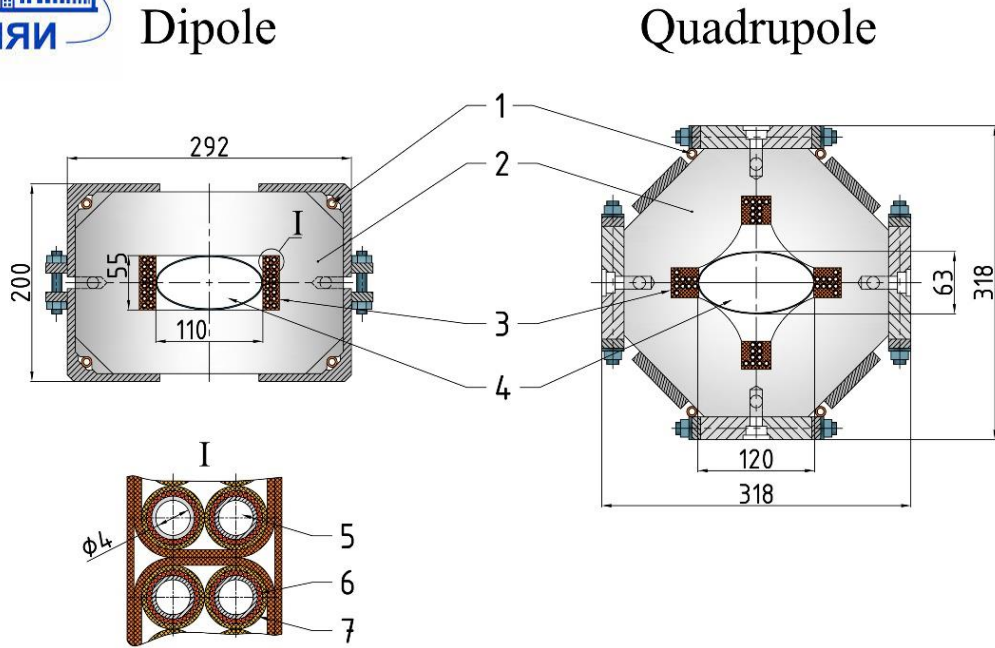
**Нуклотрон  
запущен в  
1993 г. –  
необходимо  
обновление**



**Бустер NICA  
запущен в  
2020 г.**

Сверхпроводящий (СП) ионный синхротрон Нуклотрон, предназначенный для изучения релятивистской ядерной физики, был запущен в Дубне в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (ЛФВЭ ОИЯИ) в 1993 г. Магнитная система Нуклотрона периметром 251,6 м изготовлена из магнитов с полем, формируемом холодным (4,6 К) железным ярмом и обмоткой из трубчатого сверхпроводника. Система насчитывает 96 дипольных магнитов длиной около 1,4 м, 64 квадрупольных магнита длиной 0,45 м и 28 корректирующих магнитов длиной 0,3 м, охлаждаемых принудительным потоком кипящего гелия.

# Магниты типа Нуклотрон



Модуль СП магнитной системы Нуклотрона (изображение схематическое).

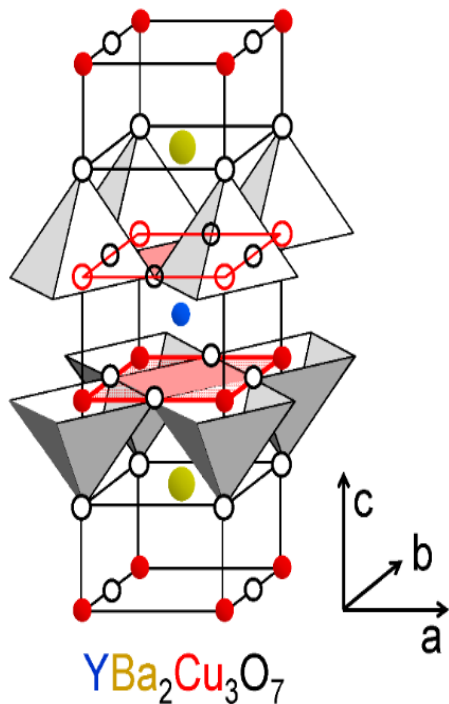
1 - трубка охлаждения железного сердечника; 2 - сердечник магнита;  
3 - СП обмотка; 4 - вакуумная камера; 5 - трубка с гелием; 6 - СП-провод;  
7 - изоляция.

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 ярма; 14 - азотный экран; 15 - подставка; 16 - регулировка подставки.

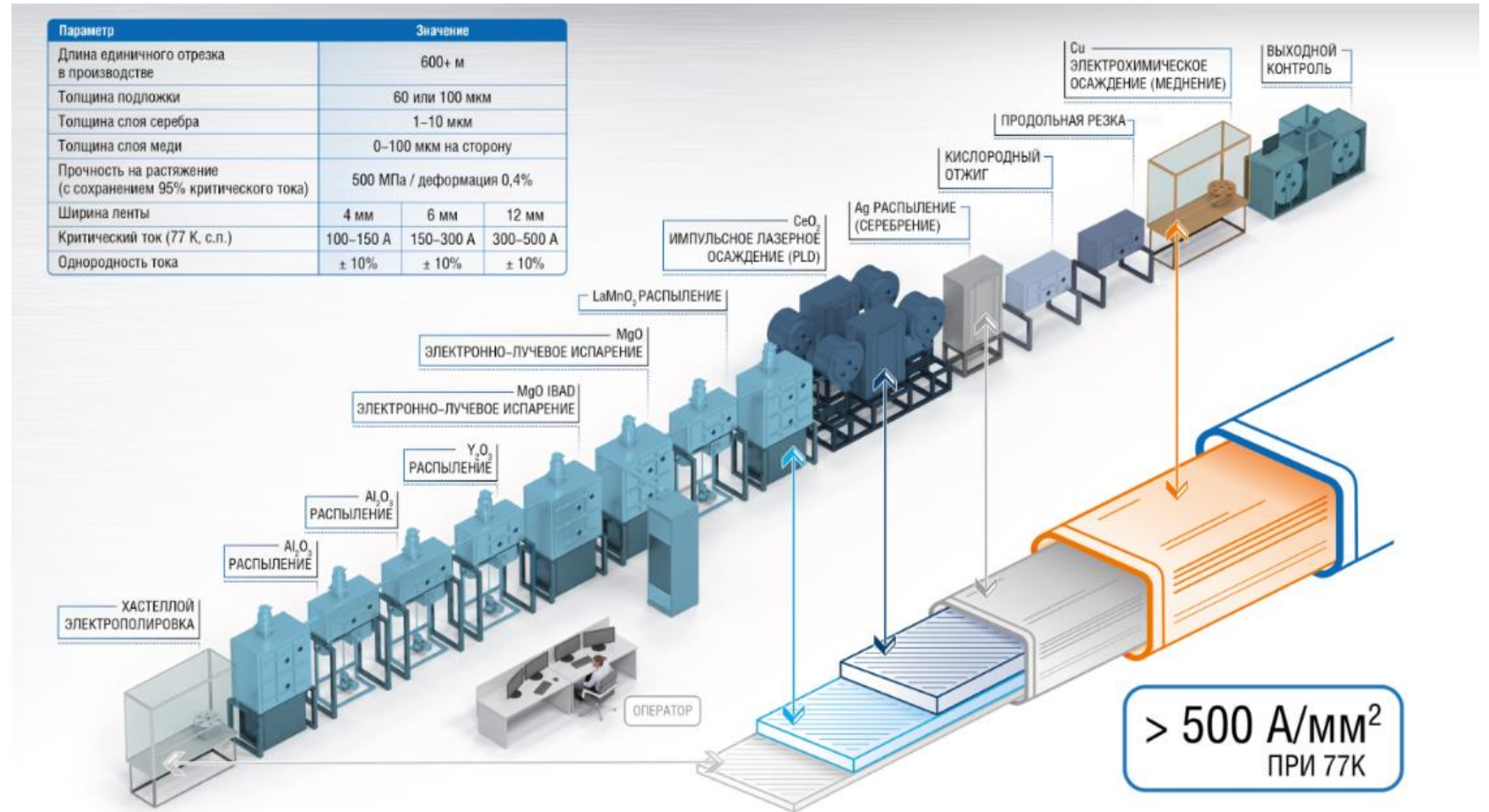
За 30 лет эксплуатации магнитная система Нуклотрона испытала около 60 циклов охлаждения/отогрева от температуры окружающей среды до 4,6 К, несколько десятков миллионов циклов возбуждения током до 6 кА и в ближайшие годы потребуются замена (скорее, потребуются сделать Новый Нуклотрон без демонтажа старого), чтобы обеспечить на длительный период бесперебойную работу в составе комплекса NICA. Как в свое время СП магниты Нуклотрона были инновацией, так и сейчас предполагается следующее поколение – ВТСП магниты, к тому же они позволят сэкономить на эксплуатационных расходах – криогеника на 30-50 К во много раз выгоднее.

# Применяемая ВТСП (ReBCO) лента 2-го поколения

- Высокополевая от С-Инновации (Суперокс) – одна из лучших, и производство рядом, в Москве
- Альтернативы?

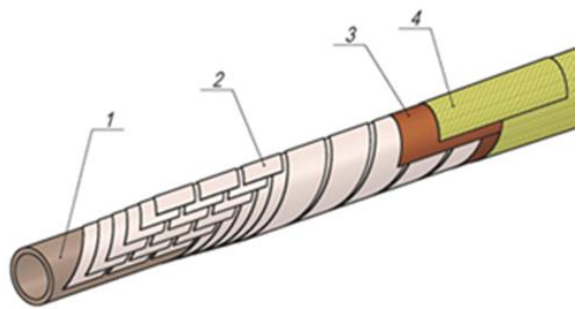


Решетка YBCO керамики

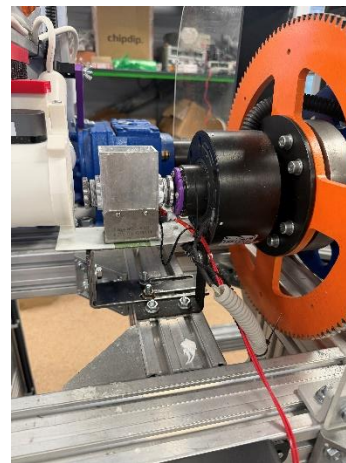


Технологический процесс изготовления ВТСП ленты 2-го поколения

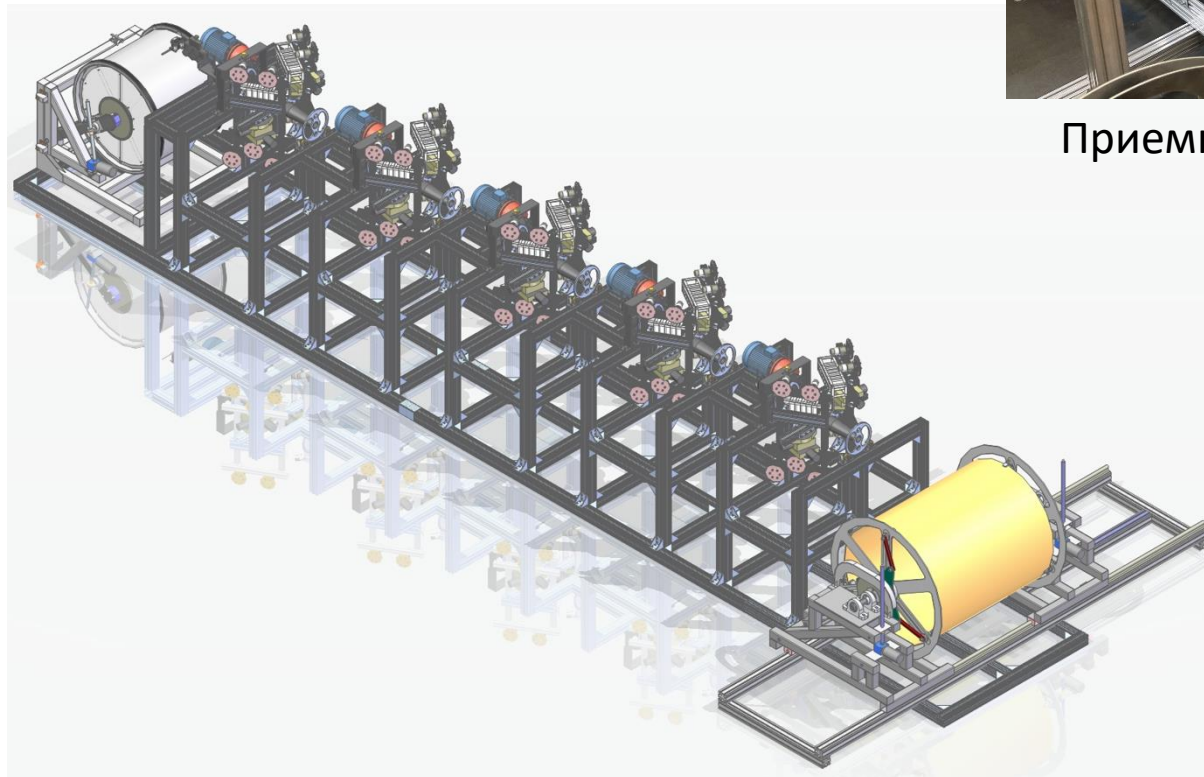
# ВТСП кабель Нуклотронного типа



- 1 - трубка-канал хладагента
- 2 – ВТСП ленты 4 мм ширины
- 3 – каптоновая лента
- 4 - препрег



Приемный узел кабеля



3D модель кабельной машины упрощенная

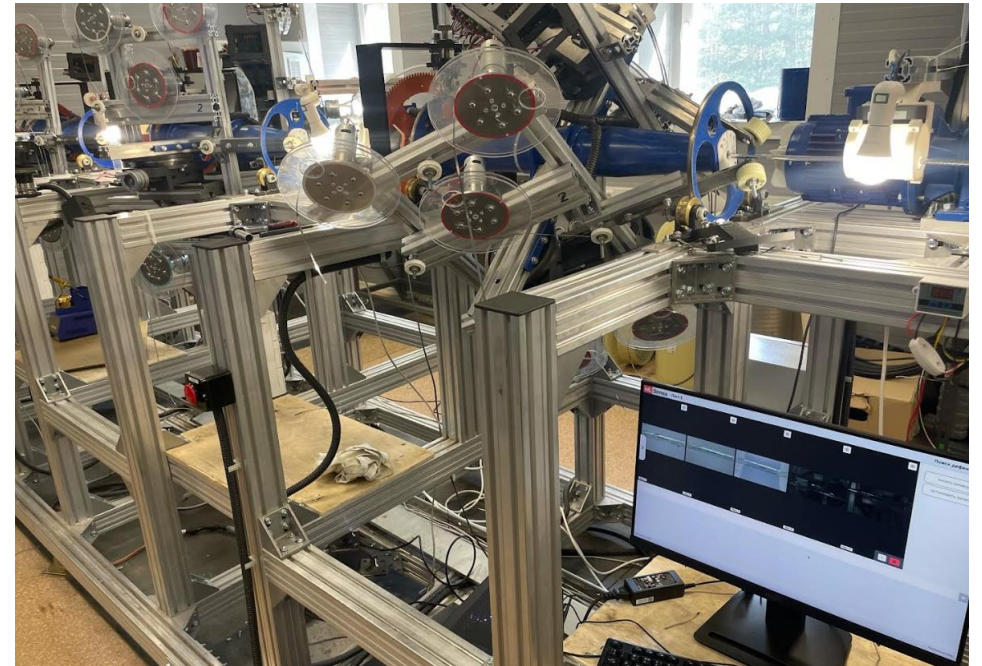
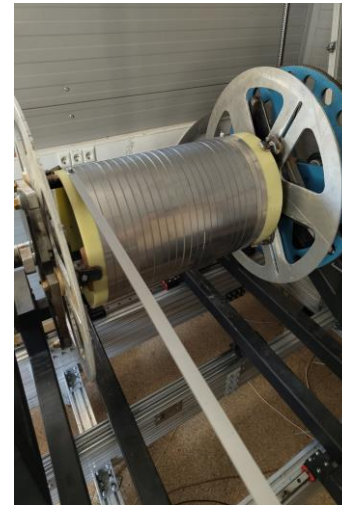
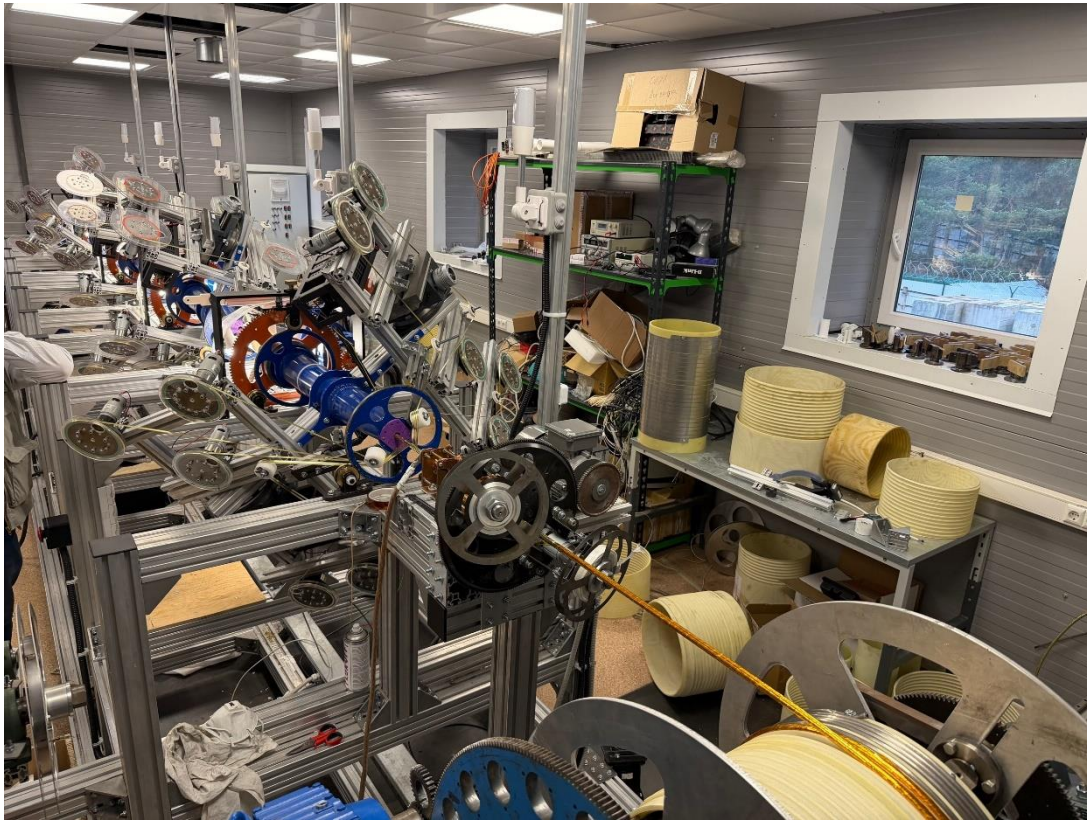


Обмотка квадруполя  
и петля из «гибкого» кабеля



Способ намотки кабеля

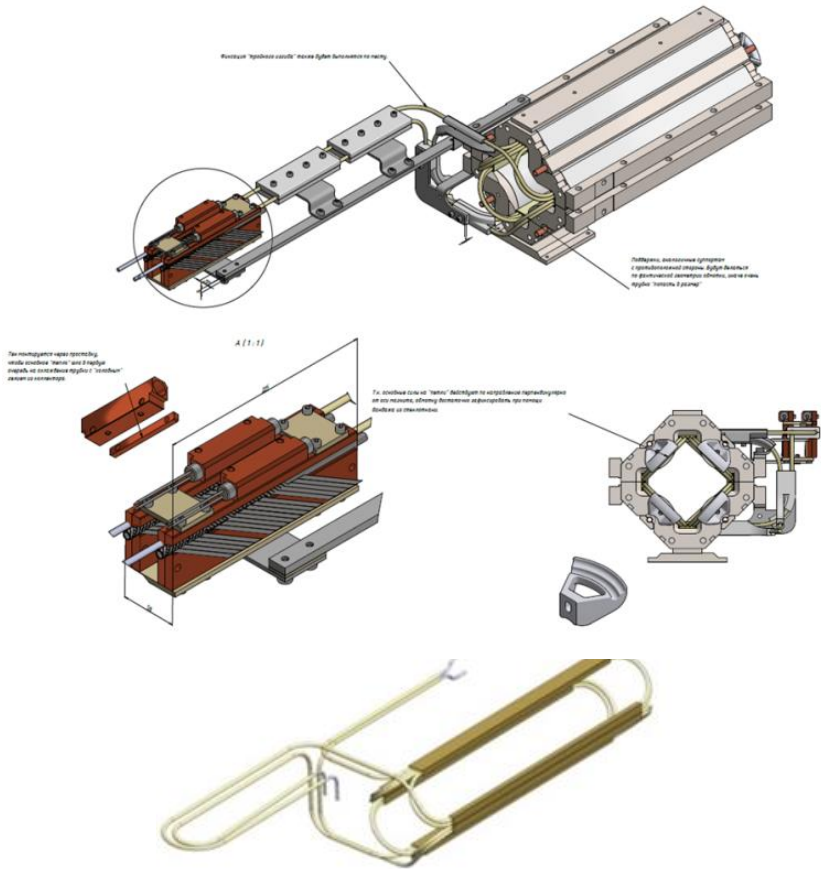
# «Серийная» кабельная машина



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

**До 50 ВТСП лент на 8 мм трубку и до 30 на 5 мм трубку + изоляция за проход, длина кабеля до 250 м**

# Первые ВТСП магниты

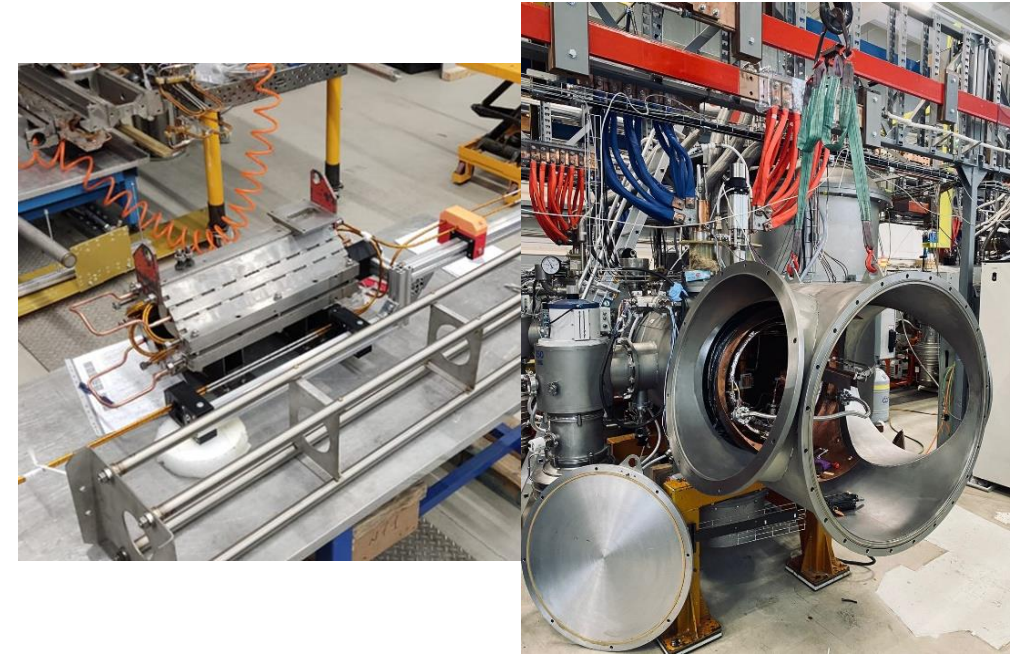


- Квадруполи с ВТСП кабелем из 18 лент, 10 кА 1.8 Тл 30 К
- Стенд для ВТСП до 15 кА до 40 кА/с 5-70 К, Ghe

Проведена разработка конструкции и технологии кабеля на 5 мм трубке, который можно гнуть на радиус 40 мм

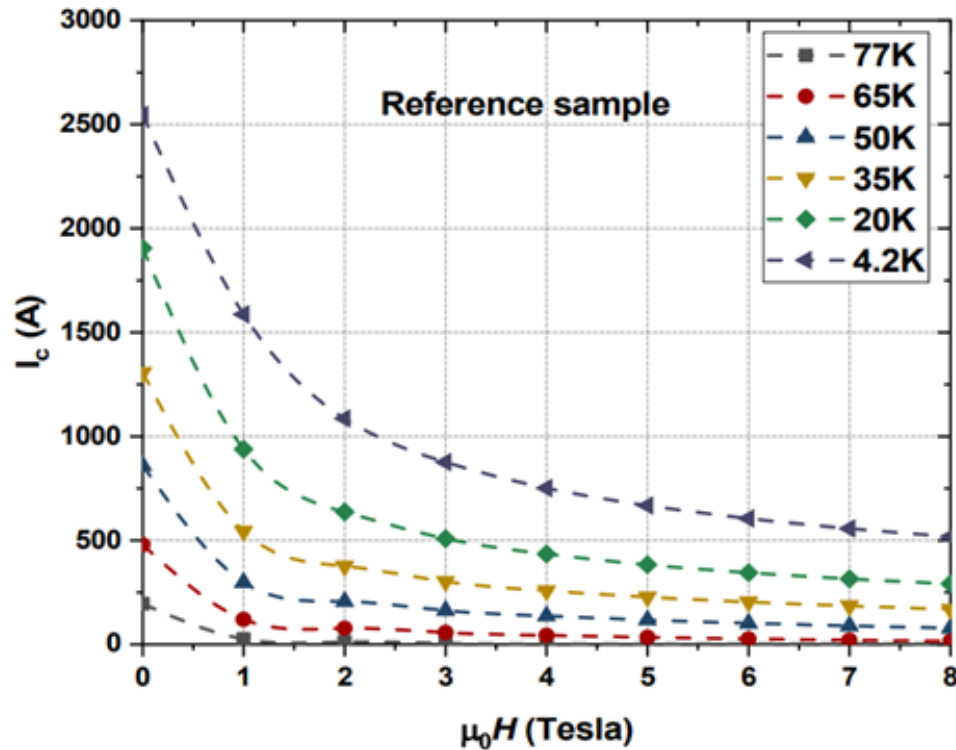
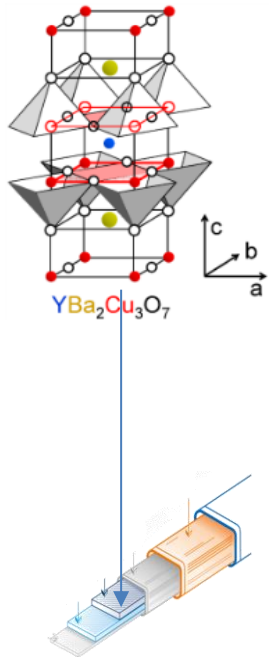
ВТСП квадрупольный магнит, модель

Из 4 изготовленных квадрупольных обмоток 2 с «правильной» конструкцией и технологией изготовления кабеля – без компаунда, и импрегнированная - показали ожидаемые параметры

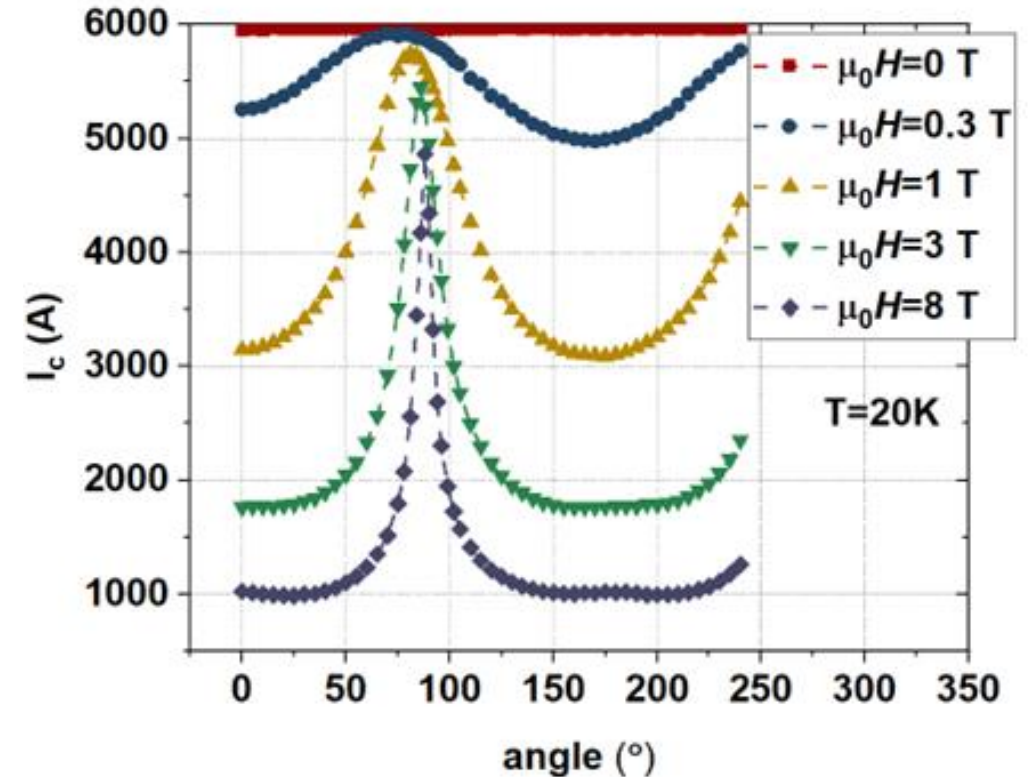


ВТСП квадрупольный магнит, «железо»

# Зависимость критического тока ВТСП ленты 2-го поколения от магнитного поля и температуры, анизотропия к полю



Зависимость критического тока от перпендикулярного ленте магнитного поля и от температуры

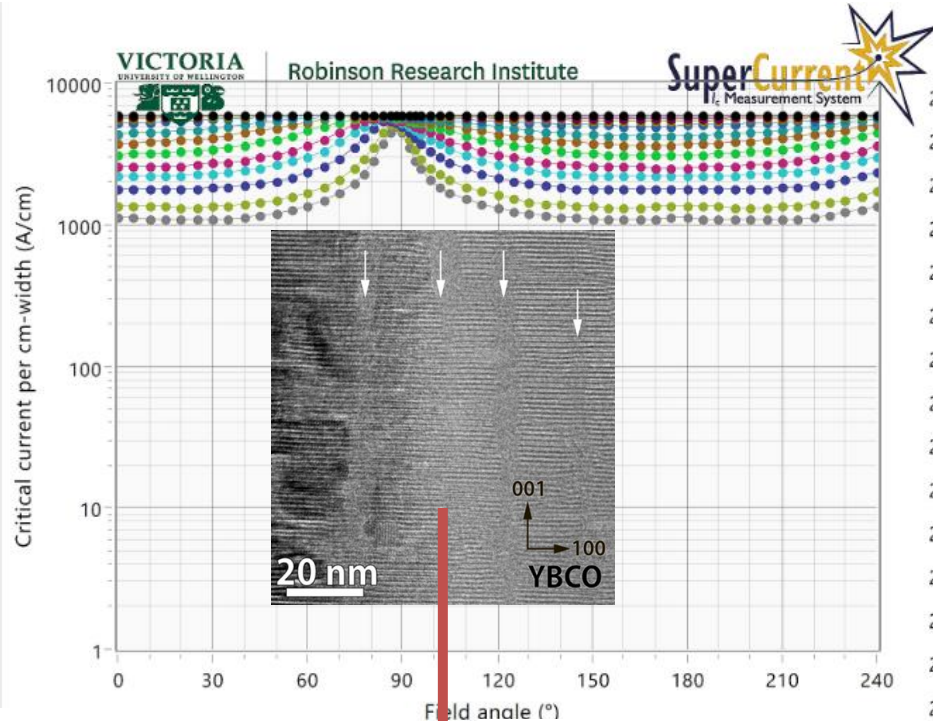
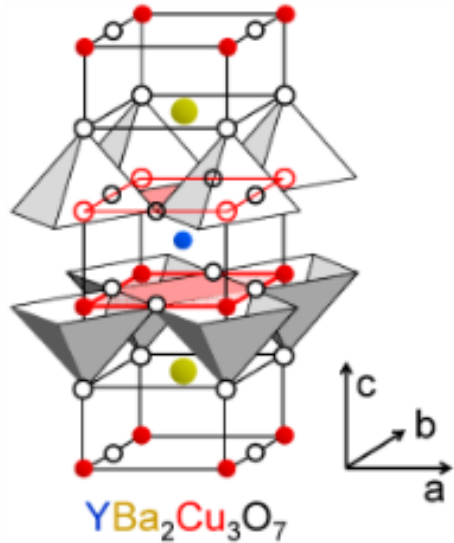


Зависимость критического тока от угла магнитного поля к поверхности ВТСП ленты при 20 К

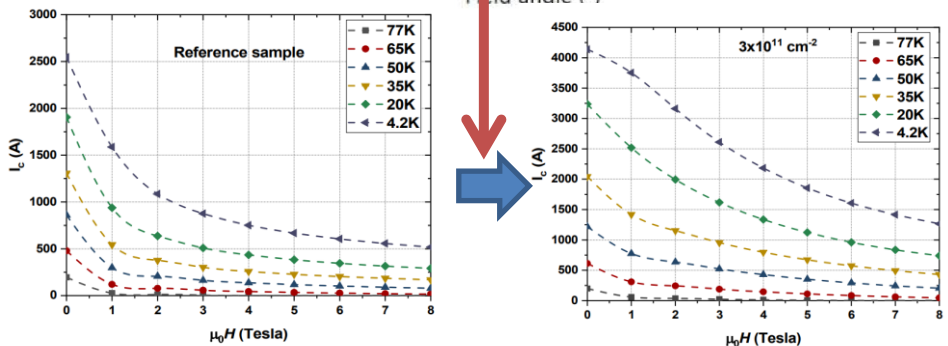
**Критический ток ВТСП лент снижается с повышением температуры, и повышением поля**  
**Он анизотропен от угла магнитного к поверхности ленты, и максимален в параллельном поле**



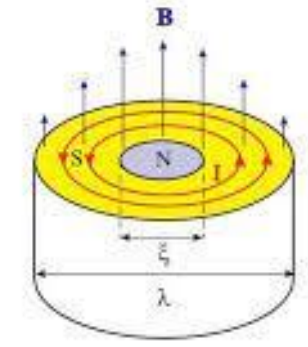
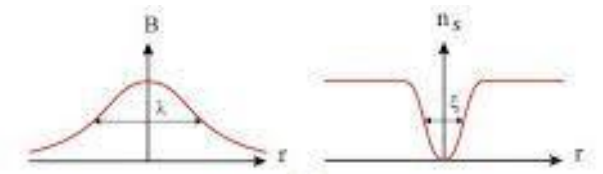
# Что такое пиннинг и зачем он в сверхпроводящем проводе



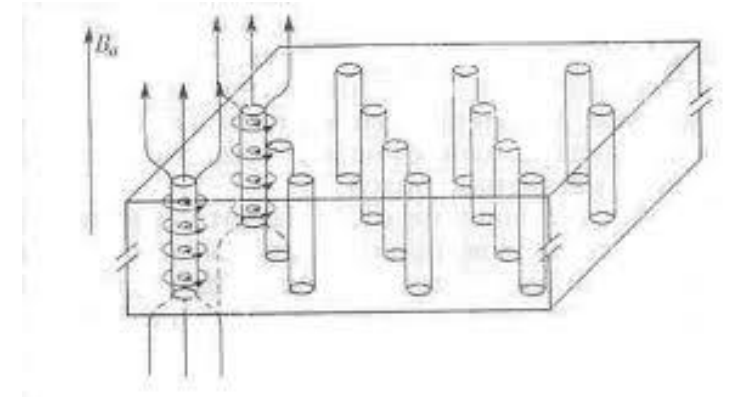
- 20K 0T
- 20K 0.01T
- 20K 0.015T
- 20K 0.02T
- 20K 0.03T
- 20K 0.05T
- 20K 0.07T
- 20K 0.1T
- 20K 0.15T
- 20K 0.2T
- 20K 0.3T
- 20K 0.5T
- 20K 0.7T
- 20K 1T
- 20K 1.5T
- 20K 2T
- 20K 3T
- 20K 5T
- 20K 7T



Закрепление абрикосовских вихрей на колумнарных радиационных дефектах увеличивает критический ток в магнитном поле и уменьшает анизотропию



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



Радиационные дефекты от заряженных частиц – лучшие дополнительные центры пиннинга



# Радиационный пиннинг ВТСП

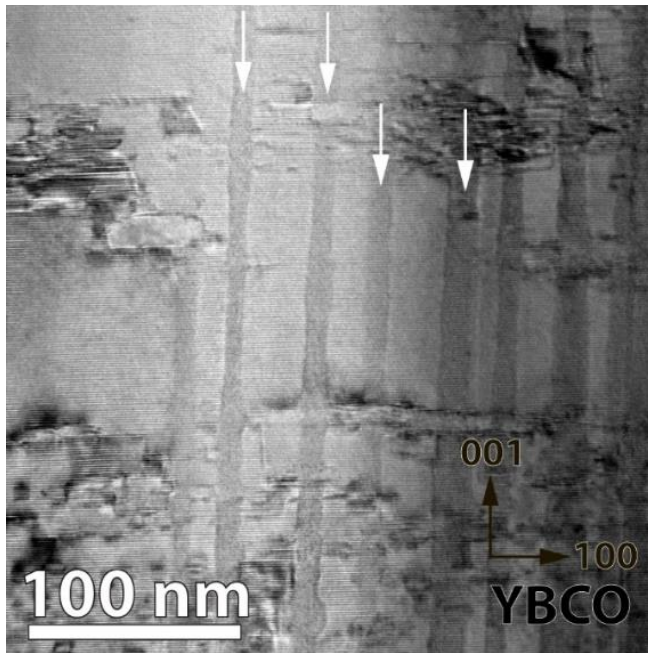


- Наилучший результат в нашем главном целевом диапазоне - около 2 Тл 50 К – на ионах циклотрона (Xe 167 МэВ) – критток ВТСП ленты увеличивается до x3.5 раз

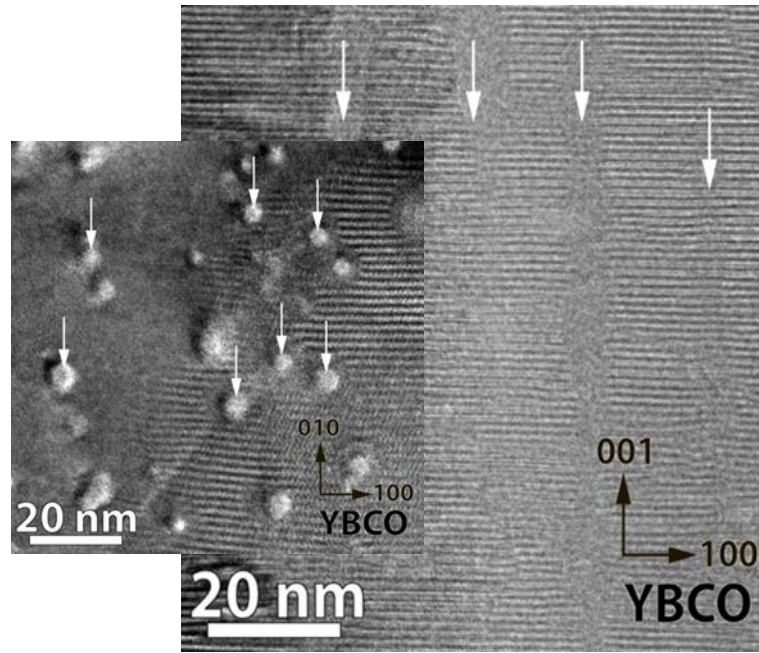
Таблица 1. Параметры исходного и облученных различным флюенсом образцов.

Флюенс, см <sup>-2</sup>	I <sub>c</sub> , А (4мм, Н=0, 77К)	I <sub>c</sub> , А (4мм, Н=2Т, 50К)	I <sub>c</sub> , А (4мм, Н=8Т, 20К)	T <sub>c</sub> , 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 <sup>10</sup>	195	257	336	88	1.144	1.887	3.39
8·10 <sup>10</sup>	233	368	400	87.8	1.163	2.33	3.81
1·10 <sup>11</sup>	274	455	496	87.7	1.175	2.413	4.53
2·10 <sup>11</sup>	270	735	734	87.4	1.227	5.346	5.03
3·10 <sup>11</sup>	198.5	635	725	87	1.179	3.079	4.39
5·10 <sup>11</sup>	171	644	921	86.5	1.192	4.359	5.29
1·10 <sup>12</sup>	63	397	906	84.5	1.268	5.294	5.89

# Треки тяжелых циклотронных ионов в ВТСП слое



## • Bi 660 MeV



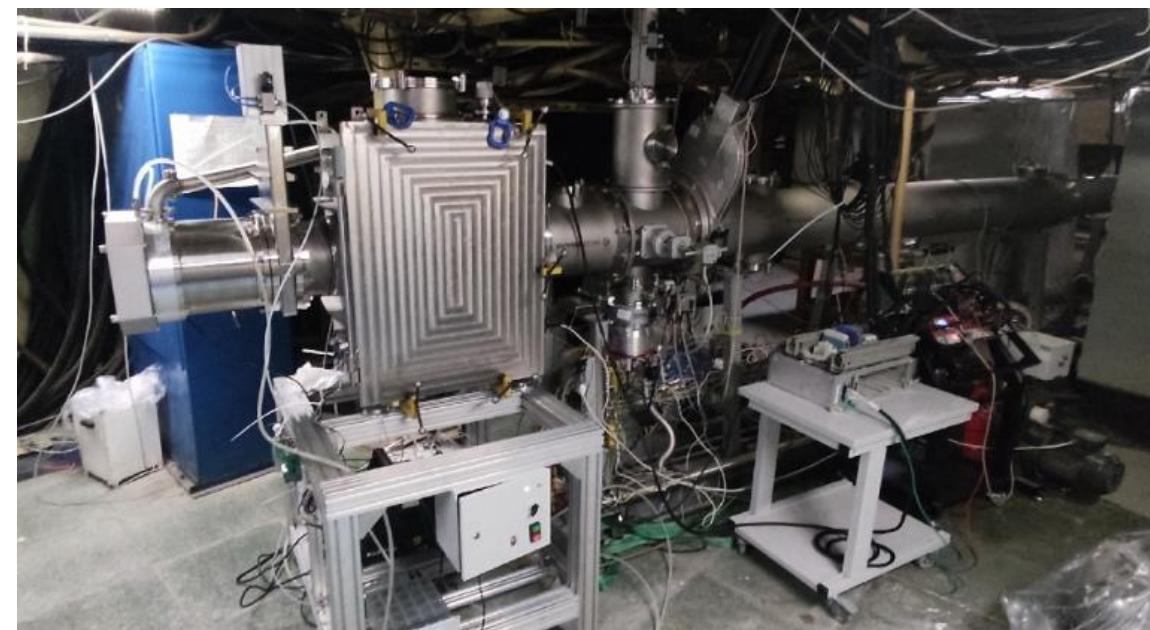
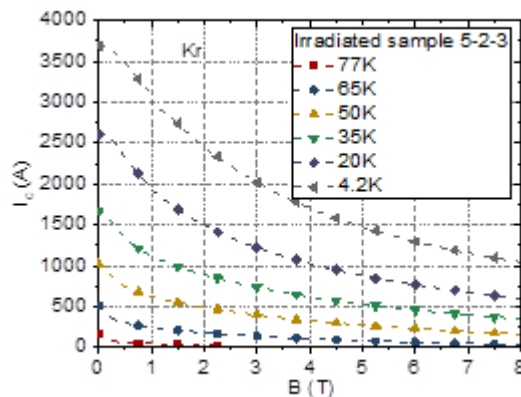
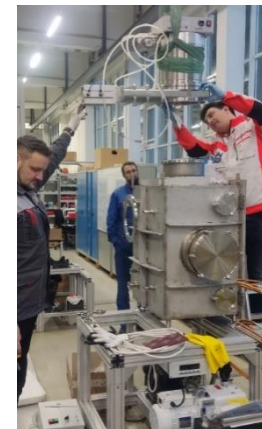
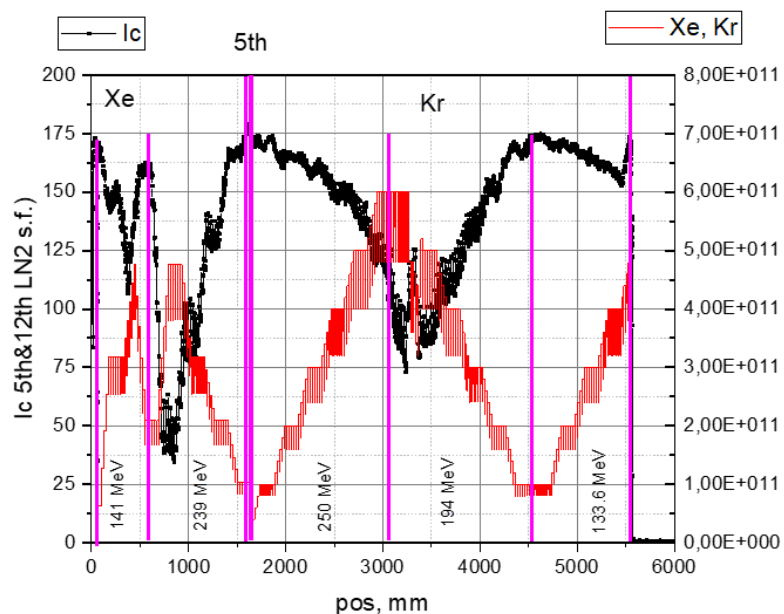
## Xe 167 MeV



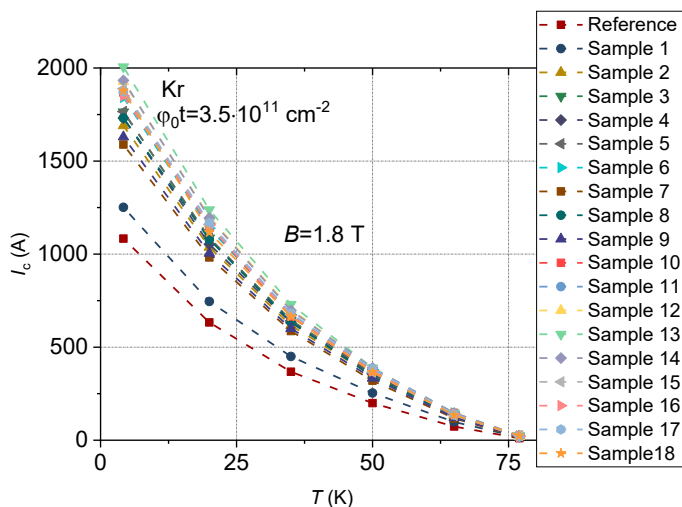
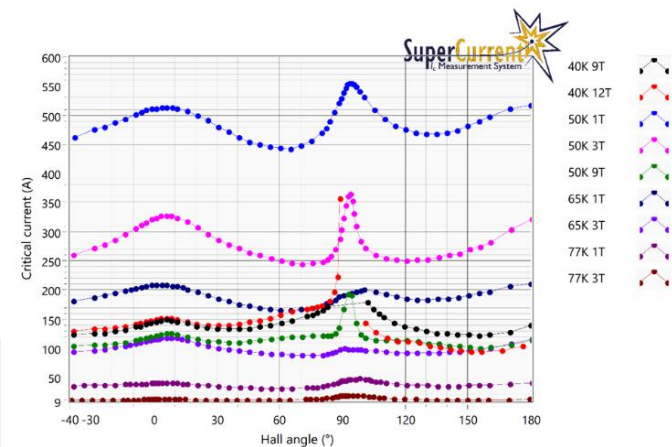
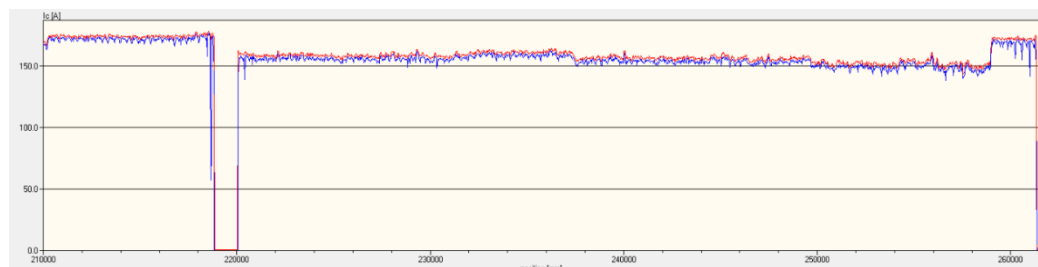
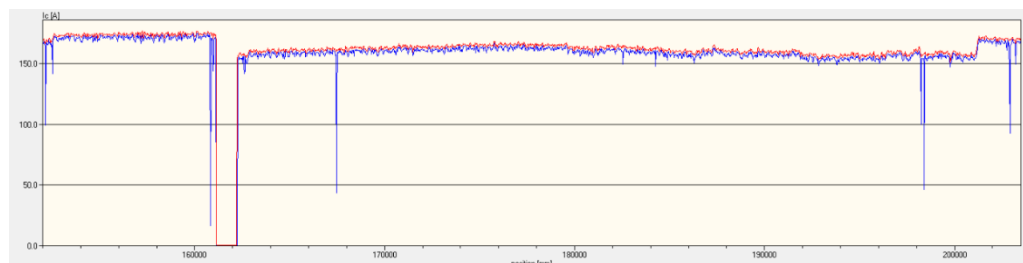
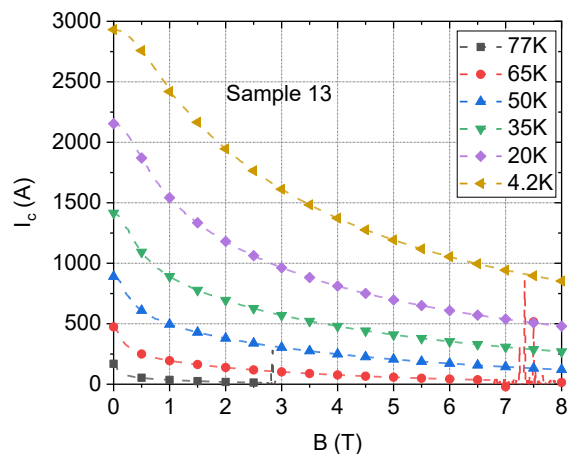
## Kr 250 MeV

Получено на просвечивающем растровом электронном микроскопе (ПРЭМ) Tecnai Osiris (Thermo Fisher Scientific, США) при ускоряющем напряжении 200 кВ, оснащённом приставкой энергодисперсионного рентгеновского микроанализа и высокоугловым кольцевым детектором тёмного поля. Поперечные и планарные срезы для проведения исследований были приготовлены с помощью сфокусированного ионного пучка Ga<sup>+</sup> на растровом электронно-ионном микроскопе Helios Nanolab 600 (FEI, США), оснащённом системой инжектирования газов на основе Pt и W и наноманипулятором OmniProbe 200.

# Разработка технологии облучения длинных кусков ВТСП лент при перематке через пучок



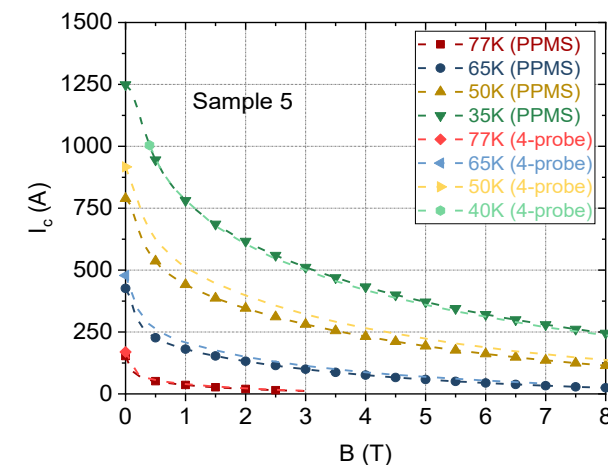
# Результаты облучения 18 бобин ВТСП ленты (суммарно около 1 км, а из них 800 м с однородными свойствами) криптоном на циклотроне У-400 в ЛЯР



Поток до  $6 \cdot 10^8$  ионов/см<sup>2</sup>\*с

Планы:

- Сеансы на ДЦ-140 с 2027 г. (большой поток Хе или Kr, создание магнитов Нового Нуклотрона, выход на коммерциализацию технологии)
- ЛУТИ – станция облучения аналогичными ионами
- «Фабрика пиннинга» со специализированным ионным циклотроном (с ВТСП обмоткой)



Получено около 800 м ВТСП ленты с почти удвоенным криттоком при 40 К 1.8 Тл, удвоение не предел

# Сравнение вариантов магнитной системы Нового Нуклотрона

Таблица 1. Сравнение видов магнитов – NbTi, и 6 видов с ВТСП

	1	2	3	4	5	6	7
Охлаждения обмотки	LHe	GHe 45 K	GHe	LNe 30 K*		LN2 65 K	
Охлаждения ярма	5 K	LN2 78 K	45 K				
Число различных потоков хладагентов в системе	2	4	3	3	3	3	3
Теплоприток и потери в обмотке диполь/линза, Вт	3 / 1	5 / 2	2 / 0.6	2.5 / 0.8		1.8 / 0.5	
Теплоприток и потери в ярме диполь/линза, Вт	20 / 6	15 / 4.5	16 / 5	18 / 5		14 / 4	
Энергопотребление криогенной системы, кВт	620 (1000?)	16.5	28	61		12.5	
Число ВТСП лент в кабеле	NbTi	24	24	24	12	50	40
Длина ВТСП лент, км	-	120	120	120	60	480	360
Трубка, мм	-	5	5	5	5	8	6.35
Слой обмотки	1	1	1	1	1	2	1
Радиационный пиннинг	-	Ic * 2-2.5		нет	Ic*2	Ic*2	Ic*3
Стоимость ВТСП (+облучение), млн руб.	0	600		450	300	2400	2000
Стоимость электроэнергии за 30 лет в режиме 9 мес/год, млн руб.	1085 (1500?)	29	49	107		22	
Тип новой криогенной системы	-	Дополнительный детандер к КГУ		Неоновый ожежитель		Переохладитель азота	
Стоимость криогенной системы, млн руб.	-	30?	50?	300?		20?	
Инновации, кроме применения ВТСП	-	Раздельное охлаждение, пиннинг ионами	Пиннинг ионами	Неон	Неон, пиннинг ионами	Азотное охлаждение! + пиннинг ионами	
Недостатки	Гелий, много ЭЭ	Все же гелий, хоть и газ, да и немного его		Неон тоже редкий газ, хотя и не утекает так		Дорого. Неудобно, – 2 слоя.	Дорого, и лента особая

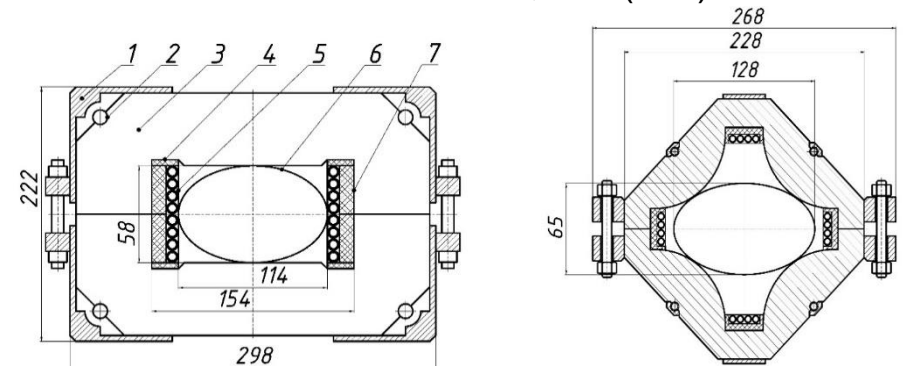
Число дипольных магнитов 48 (длина 2.88 м), квадрупольных 64 (длина 0.46 м) [3]

Мощность криогеники – из формулы идеального цикла с коэффициентами 0.15-0.35 в зависимости от температуры

Тариф на электроэнергию около 9 руб./кВт\*ч

Целесообразно охлаждать высоковакуумную камеру пучка гелием, через трубку (в нынешнем варианте NICA камера охлаждается от ярма, примерно до 20 K), из соображений получения высокого вакуума – возможно, кроме неоновом варианте. Азотные тепловые экраны тоже нужны во всех вариантах.

[3] К ВОПРОСУ ВЫБОРА МАГНИТНО-ОПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ «НОВОГО НУКЛОТРОНА» А. В. Бутенко, В. А. Михайлов, А. В. Тузиков, А. В. Филиппов, Г. Г. Ходжибагиян, Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 942–949



# План НИОКР магнитов Нового Нуклотрона 26-29 гг

- Изготовление и испытания 10-12 конструкций кабелей и спаев
- НИОКР по пиннингу на ДЦ-140 и на ЛУТИ, эксперименты и создание 2 станций облучения (технологических), расчеты размера дефектов и силы пиннинга, поиск оптимальных условий облучения – энергии, заряды, углы и флюенсы – для этого – микроскопия и измерения криттоков, исследования структуры и электронной плотности
- Стенды – на «Фабрике магнитов» модернизация и второе ВТСП плечо, стенд на базе неоновой лампы 500 Вт при SMES
- Методика ресурсных испытаний и ресурсные испытания кабелей
- Исследовательские методики (ВАХ 4-точечным в поле,  $r_{rms}$ , микроскопия сканирующая зондовая и туннельная)
- Методика проверки ВТСП лент в поле до 2 Тл при температурах 50-78 К
- Разработка, изготовление и испытания около 12 видов магнитов, по ходу этого пункта – выбор конструкции и способа охлаждения, модернизация технологий, дальнейшая адаптация конструкций и технологий «под ВТСП», создание ячейки
- Со второй половины 29 года – можно начинать развертывание производства магнитов Нового Нуклотрона

# Экспериментальные ВТСП магниты Нового Нуклотрона

Таблица 2. Магниты для Нового Нуклотрона, создаваемые в рамках НИОКР в 26-28 гг

Вид магнита	Вид охлаждения	Вид кабеля	Вид ВТСП ленты	Вид и т-ра хладагента обмотки	К-во ВТСП ленты, м	№ магнита	
Диполь модельный	Ярмо азотное, обмотка гелий/неон, камера гелий	Импрегнир.	Облученная	Гелий 40-50	750	1	
			Чистая	Неон 30-35	750	2	
		Сухой	Облученная	Гелий 40-50	750	3	
			Чистая	Неон 30-35	750	4	
	Ярмо и обмотка гелий/неон, камера гелий	Импрегнир.	Облученная	Гелий 40-50	750	5	
			Чистая	Неон 30-35	750+	6.1, 6.2	
			Облученная 12 лент	Неон			
		Сухой	Облученная	Гелий 40-50	750	7	
			Чистая	Неон 30-35	750+	8.1, 8.2	
			Облученная 12 лент	Неон			
	Диполь полномасштабный	По результатам НИОКР.				2000	9
	Квадруполь	По результатам НИОКР				800	10

# Выводы

- Нуклотрон, один из первых первый синхротронов со сверхпроводящей магнитной системой, работает с 1993 года, его оборудование изношено и во многом устарело. Имеет смысл строить Новый Нуклотрон, не разбирая старый.
- Основным вариантом обмоток диполей и квадруполей Нового Нуклотрона являются обмотки из ВТСП кабеля, возможно множество вариантов охлаждения обмоток и ярма, конструкций кабеля, обмоток и ярма.
- В ОИЯИ разработаны или дорабатываются конструкции и технологии: ВТСП кабеля Нуклотронного типа, технология радиационного пиннинга ионами. Адаптируется к ВТСП конструкция и технология магнитов типа NICA. Сделана серийная кабельная машина, станция облучения ионами (разрабатываются 2-я и 3-я), гелиевый стенд на «Фабрике магнитов» модернизирован под температуры 5-80 К, будет сделан неоновый стенд на основе ожижителя, методика ресурсных испытаний
- Необходимы (и ведутся) НИОКР для выбора варианта (из 6 + импрегнирование кабеля), оптимизации конструкции и технологии ВТСП диполей и квадруполей
- С 29 года можно будет создавать (скорее, модернизировать) производство, а в 30-32 гг производить и испытывать магниты Нового Нуклотрона